

Théorie et pratique de la géotechnique

Tome

Outils pour la conception
des ouvrages

Sous la direction
de Claude Plumelle

EXPERTISE
TECHNIQUE

EDITIONS

LE MONITEUR

2^e édition

Théorie et pratique de la géotechnique

Tome

Outils pour la conception des ouvrages

Sous la direction
de Claude Plumelle

Yu Jun Cui
Denis Fabre
Olivier Fouché
Alain Hirschauer
Claude Plumelle
Alain Tabbagh

2^e édition

**EXPERTISE
TECHNIQUE**

EDITIONS

LE MONITEUR

Directrice des éditions : Claire de Gramont

Directeur éditorial : Thierry Kremer

Éditrice : Carole Trochu

Édition et coordination des illustrations : Alain Bouteville

Édition déléguée : Michel Zelvelder

Conception de la maquette : Catherine Lattuca

Réalisation de la couverture : STDI (David Poidvin)

Mise en pages : Michel Zelvelder

Réalisation des illustrations : STDI (Shishu Vilmain, Kathy Lesueur, Julie Kroschwald, Agnès Hémeury, Charlène Gartion), Alexandre Camier

Fabrication : Anne-Lise Lapoire

© Groupe Moniteur (Éditions du Moniteur), Antony, 2017

ISSN : 2262-5089

ISBN papier : 978-2-281-14026-2



Nous alertons nos lecteurs sur la menace que représente, pour l'avenir de l'écrit, le développement massif du « photocopillage ». Le Code de la propriété intellectuelle interdit expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit.

Or, cette pratique s'est développée dans de nombreux cabinets, entreprises, administrations, organisations professionnelles et établissements d'enseignement, provoquant une baisse des achats de livres, de revues et de magazines.

En tant qu'éditeur, nous vous mettons en garde pour que cessent de telles pratiques.

Aux termes du Code de la propriété intellectuelle, toute reproduction ou représentation, intégrale ou partielle, de la présente publication, faite par quelque procédé que ce soit (reprographie, microfilmage, numérisation, numérisation...) sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite et constitue une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle. Toutefois, l'autorisation d'effectuer des reproductions par reprographie peut être obtenue auprès du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris, tél. : 01 44 07 47 70, fax : 01 46 34 67 19.

Présentation des auteurs

Directeur de recherche et professeur à l'École des Ponts ParisTech (ENPC), **Yu Jun Cui** est spécialisé en mécanique des sols non saturés et en ses applications dans les domaines du stockage des déchets nucléaires, de l'interaction sol-végétation-atmosphère, de la géotechnique ferroviaire, de la construction des remblais, de l'utilisation des sols traités [Chapitres 7, 11, 12, 14, 15, 18].

Professeur à la chaire de géotechnique du Cnam, **Denis Fabre** enseigne et a ses activités de recherche en géologie de l'ingénieur et en mécanique des roches. Il participe également à la formation des ingénieurs de Polytech Grenoble et de l'école Hassania à Casablanca, et contribue au master des travaux en souterrain de l'Aftes [Chapitre 1].

Maître de conférences à la chaire de géotechnique du Cnam, **Olivier Fouché** enseigne l'hydrogéologie. Rattaché à l'École des Ponts ParisTech (ENPC), il coordonne un projet de recherche sur les fonctions des sols en ANC et participe à un projet de modélisation hydrogéologique des nappes en milieu urbain [Chapitres 2, 13, 16].

Expert judiciaire, **Alain Hirschauer** a fait toute sa carrière au Cete Île-de-France où il était chef de la section géologie-risques naturels ; parallèlement professeur associé à la chaire de géotechnique du Cnam, il a enseigné la géologie du génie civil, la reconnaissance des sols et les travaux géotechniques [Chapitre 4].

Professeur honoraire du Cnam, **Claude Plumelle** a eu une carrière d'enseignant, d'ingénieur-conseil et de chercheur. Il a dirigé la chaire de géotechnique du Cnam de 1994 à 2005, période au cours de laquelle il a développé le cursus d'ingénieur géotechnicien de cet établissement et créé, avec l'université Paris VI, le master commun géologie-géotechnique. Dans ses activités en recherche-développement, il a été très impliqué dans les projets nationaux : Clouterre, Forever et Asiri [Chapitres 5 à 11, 13 à 15, 17 et 18].

Professeur émérite à l'université Sorbonne Université, **Alain Tabbagh** a enseigné en école d'ingénieur, en diplôme d'études supérieures spécialisées et en master, la prospection géophysique du sous-sol peu profond pour les applications au génie civil, à l'hydrogéologie, à l'étude des sols et des formations superficielles et à l'archéologie [Chapitre 3].

Introduction

Tout ouvrage (infrastructures, génie civil, bâtiment, etc.) est en interaction avec son environnement géotechnique. L'ingénierie géotechnique est donc une composante de la maîtrise d'œuvre générale indispensable à l'étude, puis à la réalisation de tout projet. Elle doit être associée aux autres ingénieries à toutes les étapes successives d'étude et de réalisation d'un projet et ainsi contribuer à une gestion efficace des risques géologiques afin de fiabiliser le délai d'exécution, le coût réel et la qualité des ouvrages géotechniques.

Le sous-sol est, de par sa nature, le domaine privilégié des incertitudes, des variabilités et des aléas (événements géologiques non prévisibles et d'extension limitée). L'objectif des missions géotechniques est de réduire les risques géologiques avec une approche graduée et progressive des missions.

Il faut rappeler qu'une bonne adaptation du projet au contexte géologique du site est nécessaire pour construire en sécurité de façon économique. Malheureusement, c'est encore trop souvent le sol qui doit s'adapter au projet quand le concepteur entreprend trop tardivement les études géologiques, hydrogéologiques et géotechniques. Enfin, l'expérience montre que tout investissement fait par le maître d'ouvrage en phase de conception pour la maîtrise des risques géologiques est hautement rentable, comme cela a été démontré dans la construction des tunnels par exemple.

Les normes géotechniques se sont largement développées ces dernières années et forment un vaste corpus. Les normes NF EN, NF ISO, NF EN ISO s'imposent aux normes NF ; par contre, les normes XP n'ont qu'un caractère expérimental. La mention EN indique que la norme a été élaborée par le CEN et la mention ISO par l'ISO. Il n'existe pas de normes ISO ou EN, ces normes sont obligatoirement transcrites par les organismes nationaux de normalisation. Les normes en génie civil, hormis celles liées à la réglementation sismique, au feu et à la sécurité publique ne sont pas obligatoires en France. Elles le deviennent dans le cadre d'un contrat signé entre deux parties, les normes étant d'application volontaire. D'autres référentiels peuvent être utilisés sous réserve que l'assurance donne son accord.

La conception et le dimensionnement d'un ouvrage nécessitent la mise au point d'un modèle géotechnique dont les caractéristiques proviennent des résultats d'essais acquis lors des investigations géotechniques (figure 1).

Concernant la conception et le dimensionnement d'un ouvrage géotechnique, on appliquera la norme nationale française NF EN 1997-1/A1 (P 94 – 251-1/A1) d'avril 2014, qui est l'application nationale de la norme européenne Eurocode 7 : Calcul géotechnique – Partie 1. Règles générales de juin 2005, complétée par l'amendement A1 d'avril 2014.

La norme nationale française NF EN 1997-2 (P 94 – 252) de septembre 2007 est l'application nationale de la norme européenne Eurocode 7 : Calcul géotechnique – Partie 2. Reconnaissance des terrains et essais de juin 2006. Elle fournit des indications sur la planification et

l'exploitation des essais géotechniques utilisés pour servir de base aux calculs géotechniques des ouvrages. Cette norme est à utiliser conjointement avec la norme de conception NF EN 1997-1/A1 (P 94 – 251-1/A1).

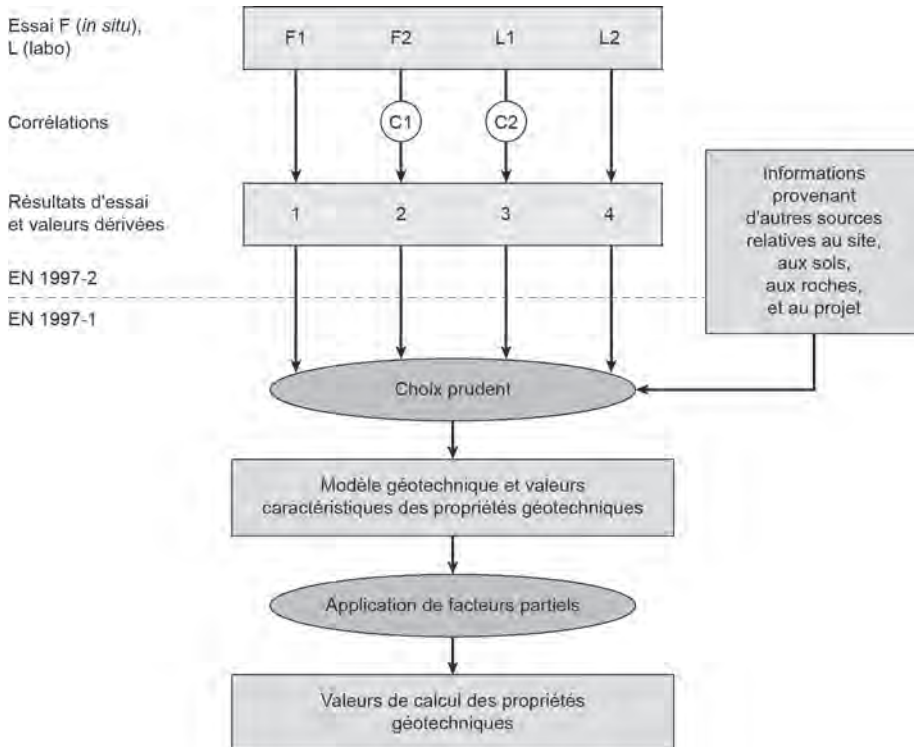


Figure 1. Cadre général pour le choix des valeurs dérivées des propriétés géotechniques d'après EC7-2

Pour les normes d'essais de laboratoire et *in situ*, on remarquera, dans la norme NF EN 1997-2 (P 94 – 252), la note indiquant : « La bibliographie fournit une liste de spécifications techniques CEN ISO/TS qui donnent des informations sur des modes opératoires, appareillage, évaluation et présentation de quelques essais de laboratoire et en place. Ces spécifications techniques peuvent devenir à terme des normes EN ISO. L'organisme national de normalisation peut rendre valide nationalement une spécification technique CEN ISO/TS, mais peut conserver en parallèle à une spécification technique des normes nationales en contradiction avec cette TS. Des annexes nationales à la norme EN 1997-2 peuvent fournir des informations vis-à-vis de la pratique nationale concernée. »

On constatera qu'en 2017 on a des normes, NF, NF EN, NF EN ISO, XP F, XP CEN ISO et qu'un grand nombre d'entre elles sont encore en révision ou à l'état de projet. On renvoie au

site <http://www.geotechnique.org> du Comité français de mécanique des sols et de géotechnique (CFMS), qui met à jour chaque année la liste des normes françaises.

Quant à la norme NF P 94-500 « Missions d'ingénierie géotechnique », elle contractualise les rapports entre la maîtrise d'ouvrage, la maîtrise d'œuvre, les entreprises et l'ingénierie géotechnique.

Révisée en novembre 2013, elle a pour objet de définir les différentes missions types de l'ingénierie géotechnique et leur enchaînement. Elle a été calée au plus près de la loi MOP (Maîtrise d'ouvrage publique) de juillet 1985.

Au départ, le maître d'ouvrage définit le programme de l'opération et fixe l'enveloppe financière. Il détermine le ou les ouvrages à construire, surfaces, descentes de charges, critères de fonctionnement et fixe un planning des études et de réalisation des travaux. Le maître d'œuvre assure la conception générale de l'ouvrage ; il élabore le projet, établit les plans, notes techniques des structures, en intégrant les éléments fournis par l'ingénierie géotechnique au fur et à mesure de l'avancement et de la réalisation du projet.

La conception et la réalisation du projet géotechnique comprennent trois étapes, deux étapes de conception et une étape de réalisation. Toutes les étapes sont obligatoires et s'enchaînent. Pour plus d'efficacité et pour limiter les risques, il est fortement conseillé que l'ingénierie géotechnique soit la même pour les trois étapes, de la conception du projet à la réalisation et au suivi des travaux.

Les investigations géotechniques (études géologiques, hydrogéologiques, reconnaissances géophysiques et géologiques, essais *in situ* et essais de laboratoire) sont indispensables à chaque étape, elles sont décrites aux chapitres 1 à 5 et 13 à 16.

Conception d'un projet géotechnique

La phase de conception comporte deux étapes, une étape géotechnique préalable et une étape géotechnique de conception (tableau 1).

Il ne faut jamais supprimer l'étape préalable au prétexte de gagner du temps et d'éviter le coût des études correspondantes. Il ne faut pas non plus vouloir entreprendre les études G1 et G2 en même temps, les missions géotechniques doivent s'enchaîner, les conclusions d'une mission G_{n-1} permettant de définir les objectifs et un programme pertinent pour la mission G_n .

Au début de la conception du projet, le maître d'ouvrage ou son mandataire doivent missionner une ingénierie géotechnique (mission G1/ES) pour effectuer les études préalables.

Le tableau 1 présente les différentes phases de la conception d'un projet géotechnique, chaque phase est développée ensuite.

Tableau 1. Conception du projet d'ouvrage géotechnique

Étapes	Phases de la maîtrise d'œuvre	Missions d'ingénierie géotechnique	Objectifs à atteindre
1 Étude géotechnique préalable (G1)		Étude de site (ES)	Spécificités géotechniques du site Première identification des risques majeurs
	Étude préliminaire d'esquisse (APS)	Principes généraux de construction (PGC)	Premières adaptations des futurs ouvrages aux spécificités du site
2 Étude géotechnique de conception (G2)	APD/AVP	Avant-projet (AVP)	Définition et comparaisons des solutions envisageables pour le projet
	PRO	Projet (PRO)	Conception et justifications du projet retenu
	DCE/ACT	Document de consultation des entreprises (DCE) Assistance pour l'établissement des contrats de travaux (ACT)	Consultation sur la technique de base retenue et ouverture à variantes Choix de l'entreprise Mise au point des contrats de travaux

Étape 1 : Étude géotechnique préalable (mission G1)

Cette mission est nécessaire pour initier le projet géotechnique, mais elle n'est pas suffisante pour définir et dimensionner le projet retenu. Pour cela, la mission G1 doit être suivie de la mission G2 de conception.

À l'étape 1, l'étude préalable G1, à la charge du maître d'ouvrage, comprend deux phases :

- **La phase « Étude de site » (ES)**, qui est à lancer avant l'étude préliminaire ou l'APS de l'ouvrage ; généralement, elle est commandée par le maître d'ouvrage avant désignation d'un maître d'œuvre. Cette étude géotechnique préliminaire de site permet une première identification des risques géologiques. Elle nécessite une enquête documentaire détaillée. Elle fait l'objet obligatoirement d'une visite du site et peut être accompagnée si nécessaire d'investigations géotechniques. Cette première étude qualitative, d'un faible coût, est indispensable pour identifier les risques majeurs (sismicité, cavités, mouvements de terrain, zones de sols compressibles, inondations, pollutions des sols et de l'eau...). Le compte-rendu de cette étude doit définir, en particulier, le programme des investigations géotechniques à réaliser lors de la phase suivante (PGC).
- **La phase « Principes généraux de construction » (PGC)**, qui comporte des investigations géotechniques importantes. Les résultats de ces investigations permettent de déterminer les hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade de l'étude préliminaire ou d'APS

de l'ouvrage. À cette phase, on peut présenter certains principes généraux de construction envisageables (par exemple, pour des ouvrages sur sols compressibles, préchargement, colonnes ballastées, inclusions rigides, *deep mixing method*). Cette phase n'inclut pas d'ébauche dimensionnelle.

À l'issue de cette étape, le maître d'ouvrage ou son mandataire assisté par l'ingénierie géotechnique retient une ou plusieurs solutions envisageables pour le projet.

Étape 2 : Étude géotechnique de conception (mission G2)

L'objectif de cette mission est la conception des différentes solutions envisageables pour le projet. Elle est à la charge du maître d'ouvrage et doit être réalisée en collaboration avec la maîtrise d'œuvre. L'étude géotechnique de conception G2 comporte trois phases (tableau 1) :

- **La phase avant-projet (AVP)**, qui contribue à la mise au point de l'ouvrage géotechnique. Elle peut nécessiter des investigations géotechniques complémentaires à celles effectuées en G1/PGC. Elle définit les hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade de l'AVP et les principes de construction envisageables. Elle fournit une ébauche dimensionnelle et une première approche des quantités. À l'issue de cette phase, le maître d'ouvrage ou son mandataire assisté par l'ingénierie géotechnique retient un type d'ouvrage géotechnique qui constituera la solution de base étudiée dans la phase projet.
- **La phase projet (PRO)**, qui définit les hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade du projet (valeurs caractéristiques des paramètres géotechniques). Elle établit les notes techniques donnant les choix constructifs des ouvrages (travaux préparatoires, plates-formes de travail, phasages, dispositions par rapport aux ouvrages existants...). Elle fournit les notes de calcul de dimensionnement au niveau projet, ainsi qu'une approche des quantités, des délais et des coûts. Elle donne les valeurs seuils (déplacements, convergences, pressions interstitielles, efforts dans des tirants...) et conclut sur la pertinence de la méthode observationnelle ou méthode interactive de dimensionnement. Cette méthode est très utile et souvent utilisée pour garantir une meilleure gestion des risques géotechniques.
- **La phase DCE/ACT**, qui contribue à l'établissement du dossier de consultation des entreprises (DCE) et à l'assistance pour l'établissement des contrats de travaux (ACT) avec le ou les entrepreneurs. Elle établit ou participe à la rédaction des documents techniques nécessaires à la consultation des entreprises pour leurs études de réalisation (dossier de la phase PRO avec plans, notices techniques, critères de performance, notes de calcul, plans d'instrumentation, définition de la méthode observationnelle, cahier des clauses techniques particulières (CCTP), bordereaux de prix, planning prévisionnel). L'ingénierie géotechnique assiste la maîtrise d'ouvrage ou la maîtrise d'œuvre pour la sélection des entreprises, puis elle analyse les offres techniques (projet de base et variantes). Elle participe à la finalisation des pièces techniques définitives des contrats de travaux.

Réalisation du projet géotechnique

La réalisation du projet géotechnique comporte une phase « étude » et une phase « suivi » très importantes et indispensables pour les ouvrages géotechniques. Ces deux phases sont à la charge de l'entreprise adjudicataire sous la supervision de l'ingénierie géotechnique mandatée par le maître d'ouvrage ou son représentant (tableau 2).

Tableau 2. Réalisation du projet d'ouvrage géotechnique

Étape	Phases de la maîtrise d'œuvre	G3 (entreprise)	G4 (maître d'ouvrage)	Objectifs à atteindre
3 Études géotechniques de réalisation (G3/G4)	EXE/VISA	Phase Études	Supervision de l'étude géotechnique d'exécution	Études d'exécution conformes au projet
	DET/AOR	Phase Suivi	Supervision du suivi géotechnique d'exécution	Maîtrise des risques durant l'exécution des travaux et vérification des objectifs de l'ouvrage géotechnique

Étape 3 : Études géotechniques de réalisation

L'étape de réalisation des travaux de l'ouvrage géotechnique est entreprise après l'étude géotechnique de conception (G2 DCE/ACT) figurant dans le contrat de travaux. Elle comporte deux missions distinctes et simultanées :

- étude et suivi géotechnique d'exécution (mission G3), à la charge de l'entrepreneur qui réalise le chantier, l'entrepreneur peut sous-traiter cette mission à une ingénierie différente de celle de la maîtrise d'ouvrage et de la maîtrise d'œuvre ;
- supervision géotechnique d'exécution (mission G4), à la charge de la maîtrise d'ouvrage ou de son mandataire en collaboration avec la maîtrise d'œuvre.

Étude et suivi géotechniques d'exécution (mission G3)

Par le suivi continu sur site des travaux, elle permet de confirmer le modèle géotechnique retenu pour la conception du projet. En cas de rencontre de conditions géotechniques ou de comportement des ouvrages géotechniques en cours de réalisation significativement différents de ceux prévus mais identifiés comme risques possibles, ce suivi permet d'adapter ou de modifier la partie correspondante de l'ouvrage et de recalculer les modèles de calcul et/ou les méthodes d'exécution. Dans le cas de conditions géotechniques non identifiées au stade de l'étude, ce suivi permet de sécuriser l'ouvrage et les avoisinants, puis de procéder à la réalisation d'investigations géotechniques complémentaires nécessaires au diagnostic (mission G5)

et à la reprise correspondantes des études d'exécution G3 initiale ou de l'étude G2 si la conception est modifiée.

Elle se déroule en deux phases interactives.

Phase étude

L'entreprise étudie dans le détail la réalisation du chantier de l'ouvrage géotechnique.

Elle définit un programme d'investigations géotechniques spécifiques, si nécessaire, en fonction des données existantes et en assure le suivi technique et l'exploitation des résultats. Elle établit la note d'hypothèses géotechniques sur la base des données fournies par l'étude géotechnique de conception (G2 DCE/ACT) et le contrat de travaux ainsi que les résultats des éventuelles investigations prescrites ci-dessus.

Elle définit les ouvrages, leur dimensionnement, les notes de calcul justificatives, les plans d'exécution et établit les méthodes et les conditions d'exécution, le phasage, les spécifications et les plans correspondants.

Elle fournit le plan de suivi et contrôle des travaux avec description des auscultations à réaliser et des valeurs seuils, ainsi que des dispositions constructives complémentaires nécessaires en cas d'atteinte de celles-ci dans le cas de l'application de la méthode observationnelle.

Cette étude d'exécution doit être réalisée en amont des travaux correspondants et fait l'objet d'un visa de la maîtrise d'œuvre après avis de l'ingénierie géotechnique en charge de la mission G4.

Phase suivi d'exécution

Dans cette phase, l'entreprise procède ou fait procéder par une entreprise extérieure aux opérations de contrôle interne et externe.

Elle vérifie la conformité du contexte géotechnique rencontré avec celui pris en compte dans la phase étude.

Elle assure la mise en place de l'auscultation des ouvrages et toutes les mesures durant l'exécution des travaux et éventuellement après la livraison de l'ouvrage. Dans le cas d'application de la méthode observationnelle, elle applique les dispositions constructives prédéfinies en phase étude.

Dans le cas où les conditions géotechniques seraient plus favorables que celles envisagées dans la phase étude, elle propose la mise en œuvre des mesures d'optimisation prédéfinies en phase étude.

Elle établit un programme d'investigations géotechniques supplémentaires si nécessaire, le réalise et en assure le suivi et en exploite les résultats.

Elle établit au fur et à mesure les documents synthétiques précisant les conditions géotechniques rencontrées, le comportement des ouvrages en phase de construction et l'impact sur les avoisinants.

Elle établit la prestation géotechnique du dossier des ouvrages exécutés (DOE) et le dossier d'interventions ultérieures sur l'ouvrage (DIUO).

Supervision géotechnique d'exécution (mission G4)

La mission G4, à la charge du maître d'ouvrage, concerne la supervision géotechnique d'exécution dans le cadre de la maîtrise d'œuvre. Elle permet de vérifier la conformité de l'étude et le suivi géotechnique de l'entreprise aux objectifs du projet. La mission G4 comporte deux phases.

Phase supervision de l'étude

Cette phase permet de vérifier les documents établis par l'entrepreneur (mission G3 de l'entreprise). Elle consiste à vérifier et donner un avis sur les hypothèses géotechniques, les dispositions constructives de l'entreprise, les notes de calcul, les plans, les fiches produits, les programmes de suivi et d'auscultation y compris la méthode observationnelle.

Phase supervision du suivi d'exécution

Cette phase a pour objectif, par une intervention périodique et discontinue sur le chantier, de vérifier que le suivi géotechnique d'exécution, à la charge de l'entrepreneur, permet de confirmer à l'avancement des travaux le modèle géologique et le contexte géotechnique retenus ainsi que la similitude entre comportement prévu et comportement observé de l'ouvrage et des ouvrages avoisinants.

L'ingénierie géotechnique donne son avis sur les résultats des mesures des auscultations et vérifie la bonne application de la méthode observationnelle. Elle valide toute adaptation de l'ouvrage, tout changement de planning.

Diagnostic (mission G5)

Pendant le déroulement du projet, il peut être nécessaire de procéder de façon limitative à l'étude d'un ou plusieurs éléments géotechniques spécifiques.

Cette mission ne concerne strictement que l'ouvrage ou la partie d'ouvrage géotechnique spécifiée sans aucune implication dans la globalité du projet. Si ce diagnostic conduit à modifier tout ou partie du projet, des études géotechniques de conception et/ou d'exécution ainsi qu'un suivi et une supervision géotechnique seront réalisées ultérieurement.

L'étude géologique développée au chapitre 1 initie l'enchaînement des missions géotechniques dans les études géotechniques préliminaires. Elle est indispensable pour les grands ouvrages de génie civil, les ouvrages linéaires, les tunnels, mais elle ne doit pas être oubliée pour des ouvrages plus modestes, tels que bâtiments, voiries et réseaux divers. L'étude géologique permet d'identifier dès le départ, avant l'élaboration du projet, les grands risques géologiques : failles, zones de glissement, zones karstiques, terrains argileux, vallées compressibles, etc. ; elle guide souvent le choix et l'implantation des reconnaissances.

Références

XP P 94-010 (décembre 1996 – Indice de classement : P 94-010) Sols : reconnaissance et essais – Glossaire géotechnique – Définitions – Notations – Symboles.

NF P 94-500 (novembre 2013 – Indice de classement : P 94-500) Missions d'ingénierie géotechnique – Classification et spécifications.

Géologie des sols	Chapitre 1	
-------------------	---------------	--

Les ouvrages géotechniques concernent la plupart du temps la tranche superficielle de l'écorce terrestre sur une profondeur n'excédant qu'exceptionnellement une cinquantaine de mètres. Par ailleurs, ces ouvrages sont concentrés dans les zones urbanisées et particulièrement dans les grands centres urbains, c'est-à-dire, en général, dans des zones à faible relief en site alluvial (vallées) ou proches des rivages (plaines côtières).

Sur le plan géologique, cela implique que les terrains concernés par les aménagements sont très souvent constitués de la tranche superficielle altérée du substrat (terrains autochtones) et/ou de matériaux sédimentaires transportés, puis déposés par les cours d'eau et les courants côtiers (terrains allochtones). Pour le géologue, il s'agit de roches meubles, mais le vocabulaire a consacré plutôt le terme de sol, repris dans le vocabulaire classique de mécanique des sols.

La reconstitution de l'histoire des sols permet souvent de comprendre leur organisation spatiale en couches ou lentilles (structure) ; et leur origine (nature) explique beaucoup de leurs propriétés géotechniques. Il nous a donc paru intéressant de donner brièvement, dans ce premier chapitre, quelques notions sur l'origine et l'histoire géologique des sols, utiles en vue de la réalisation des terrassements et des ouvrages de génie civil.

1.1 Minéraux et roches

1.1.1 Définitions de base

Même si une fraction organique peut exister dans certains sols (tourbe, etc.), ceux-ci sont principalement constitués de grains minéraux issus d'une roche préexistante. Les roches superficielles fournissent la matière nécessaire à l'élaboration de la quasi-totalité des matériaux de construction (pierres de taille, granulats routiers et à béton, métaux, ciment, chaux, plâtre, briques et tuiles, etc.), à l'exception de quelques produits d'origine organique (bois principalement et certaines matières plastiques dérivées du pétrole).

1.1.1.1 Minéral

Bien que minéral et cristal soient en général des notions associées, nous préférons les distinguer (il existe quelques rares cas de minéraux non cristallisés, voir § 1.1.1.2).

Un minéral est une substance solide (à la pression et à la température de la surface de la Terre), ayant une formule chimique bien définie, dans laquelle n'intervient pas d'association carbone-hydrogène. Les minéraux sont principalement composés des atomes les plus fréquents à la surface de la Terre : l'oxygène (47 %), le silicium (27 %), l'aluminium (8 %), le fer (5 %), le calcium (3,7 %), le sodium (2,8 %), le potassium (2,6 %), le magnésium (2,1 %), etc. En particulier, la famille la plus représentée est celle des silicates où figure, associé à d'autres atomes, le groupement SiO_4 . On connaît aujourd'hui plus de 3 000 espèces minérales.

1.1.1.2 Cristal

Un cristal est un minéral structuré géométriquement à l'échelle de l'arrangement des molécules (figure 1.1). Il possède en conséquence une forme géométrique caractéristique, dont les dimensions peuvent atteindre quelques centimètres. Un minéral non cristallisé est un verre.

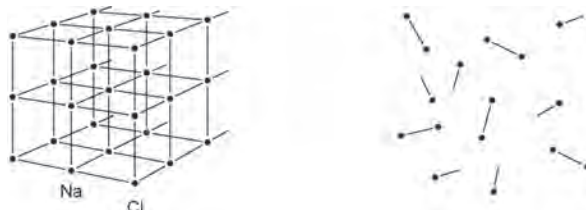


Figure 1.1. État cristallin (exemple du sel) et état amorphe

À la surface de la Terre, la matière minérale naturelle est le plus souvent cristallisée, mais les cristaux sont en général invisibles à l'œil nu (voir § 1.1.2.1). En fait, les verres naturels ne se forment que lors de certaines éruptions volcaniques, lorsque le refroidissement du magma initial liquide est trop rapide pour que la matière puisse s'organiser en se solidifiant.

La figure 1.2 montre quelques exemples de cristaux courants : le quartz (SiO_2), la calcite (CaCO_3), le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

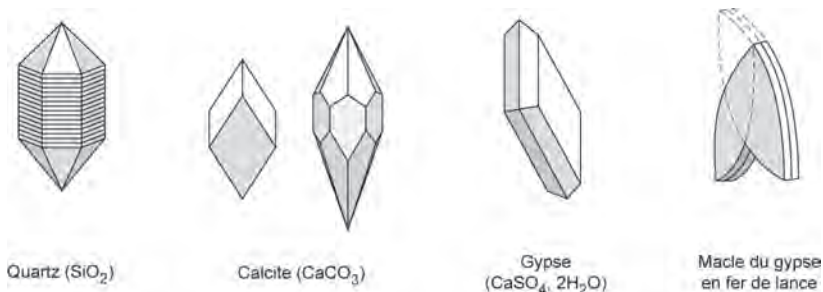


Figure 1.2. Cristaux courants : quartz, calcite, gypse (deux formes)

Il existe sept principaux systèmes cristallins, le plus simple à décrire étant le système cubique où les molécules occupent les sommets d'un cube de côté constant (la maille). Mais de nombreuses variétés faisant intervenir des arrangements entre parties de cristaux, à partir de défauts du réseau cristallin (les macles), font que la forme géométrique des cristaux est beaucoup plus variée que le nombre restreint des systèmes cristallins ne le laisse supposer. En fait, il est très rare que deux minéraux distincts aient la même forme cristalline.

Les propriétés optiques permettent l'identification des minéraux cristallisés : le dispositif classique utilise des lames minces (épaisseur de 30 μm) observées au microscope en lumière polarisée.

1.1.1.3 Roche

Les roches sont des agrégats polycristallins, associant des minéraux divers (voir la lame mince de la photo 1.1). Une roche est dite monominérale lorsqu'elle est composée à plus de 95 % du même minéral. En général, les roches sont constituées de quelques minéraux principaux et de plusieurs minéraux dits accessoires, en petites quantités parfois localisées (« impuretés »).

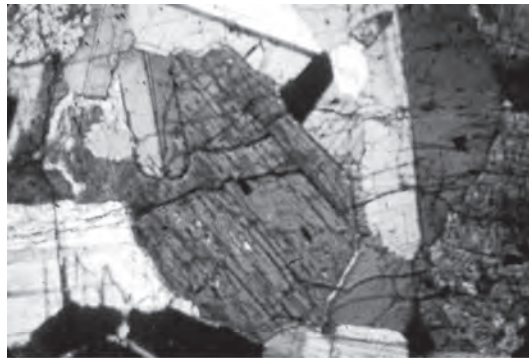


Photo 1.1. Lame mince dans une roche magmatique

Les gros cristaux sont centimétriques.

La très grande variété des minéraux et de leurs proportions au sein des roches et la nécessité d'avoir le plus souvent recours au microscope pour les distinguer font qu'il est peu commode d'utiliser la composition minéralogique comme critère de classification simple des roches.

1.1.2 Identification des minéraux importants

Nous indiquerons ici des moyens simples pour reconnaître les minéraux les plus courants. Une analyse visuelle fine et des tests simples renseignent rapidement sur des données fondamentales de nature (quartz, calcite, etc.) et de texture (taille et forme des grains) qui conditionnent les propriétés géotechniques.

1.1.2.1 Pouvoir séparateur de l'œil

C'est une notion physiologique très utile pour l'observation fine en général, qui présente un intérêt particulier pour le génie civil. L'œil humain est en effet susceptible de distinguer les particules de matière (les « grains »), pour peu que leur taille soit supérieure à environ $1/10^e$ de mm (100 μ m).

Cela est particulièrement intéressant pour l'analyse des sols et des matériaux de construction. Les « fines » (généralement indésirables pour la fabrication du béton), par exemple, sont les particules traversant le tamis à 80 μ m ou 63 μ m (dernier tamis de la colonne usuelle de tamis). Avec un peu d'exercice, on peut les distinguer visuellement des grains plus grossiers, évaluer leur importance et établir une granulométrie approchée applicable aux matériaux meubles (graves, sables, limons, etc.).

1.1.2.2 Observations simples : couleur, éclat, structure cristalline et clivages éventuels

La couleur n'est pas une caractéristique absolue d'un minéral et même d'un cristal, puisque d'infimes défauts de la structure, modifiant les propriétés optiques, ou la présence d'une impureté minérale colorée peuvent changer complètement sa couleur. Le cristal si caractéristique du quartz (prisme hexagonal pyramidé), normalement translucide (cristal de roche) peut apparaître sous des couleurs aussi variées que le blanc grisâtre (quartz commun), le noir (quartz enfumé), le violet (améthyste), le rose, etc.

L'éclat, c'est-à-dire l'aptitude à renvoyer la lumière, doit être apprécié sur une cassure fraîche de la roche (d'où l'un des intérêts du marteau de géologue). Il peut varier un peu pour les minéraux en fonction de la taille et de la forme des grains et, également, en fonction de leur état d'altération. Il est cependant intéressant d'utiliser une échelle qualitative à cinq niveaux :

1 – métallique ; 2 – vitreux ; 3 – gras ; 4 – mat ; 5 – terreux.

La structure cristalline, comme signalé plus haut, est caractéristique du minéral. Encore faut-il pouvoir distinguer les cristaux à l'œil nu. L'observation des cristaux et de leurs propriétés optiques est à la base de la détermination minéralogique sur lames minces de roches à l'aide du microscope optique (photo 1.1). Un trait important de certains cristaux est la présence en leur sein de plans de séparation (clivages) parallèles aux faces externes du cristal. On distingue ainsi des « débits » en parallélépipèdes (trois clivages) ou en plaques (un clivage).

1.1.2.3 Tests simples : dureté, comportement avec l'eau, réaction HCl dilué

Le test de dureté, qui consiste à frotter deux minéraux l'un contre l'autre et à examiner lequel des deux a laissé une empreinte (rayure) sur l'autre, est sans doute le premier test mécanique réalisé dans l'histoire des hommes pour rechercher la matière de base de leurs outils.

Il y a plus d'un siècle, une échelle de dureté minéralogique a été définie par Mohs. Elle comporte 10 niveaux :

1 – Talc ; 2 – Gypse ; 3 – Calcite ; 4 – Fluorine ; 5 – Apatite ;
6 – Orthose ; 7 – Quartz ; 8 – Topaze ; 9 – Corindon ; 10 – Diamant.

Le quartz (silice, silex, etc.) y apparaît comme la matière courante la plus dure que l'on puisse trouver facilement dans la nature. Cette échelle à 10 niveaux est cependant peu commode à utiliser. On emploie plutôt l'échelle réduite suivante :

2,5 – Ongle ; 5,5 – Acier ; 6,5 – Verre ; 7,8 – Carbure de tungstène.

Les valeurs données sont approximatives pour les aciers (entre 5 et 6 selon leur nature) et les verres (entre 6 et 7 selon leur nature). Cette échelle permet de classer les minéraux en cinq classes de dureté :

tendre ; mi-dur ; dur ; très dur ; extrêmement dur.

La matière tendre est rayée par l'ongle ; la mi-dure raye l'ongle, mais est rayée par l'acier ; etc.

Le comportement en présence d'eau est également un test très utile. Il permet de distinguer rapidement :

- un minéral très soluble (300 g/l), le sel (NaCl) ;
- une famille de minéraux hydrophiles, formant avec l'eau un amalgame un peu collant, les argiles (voir § 1.1.3).

Tableau 1.1. Caractéristiques et usages de quelques minéraux courants

Minéral	Formule	Dureté (Mohs)	Système cristallin	Densité	Particularités et usages
Quartz	SiO ₂	7	Hexagonal	2,65	Très dur et abrasif Granulats, laine de verre
Orthose	K(Si ₃ AlO ₈)	6	Hexagonal	2,56	Dur et résistant Granulats, grès cérames
Calcite	CaCO ₃	3	Hexagonal	2,71	Résistant, mais non abrasif Chaux, ciments, granulats
Gypse	CaSO ₄ , 2H ₂ O	2	Mono-clinique	2,32	Peu résistant, soluble (2 g/l) Plâtre
Biotite	K (Mg, Fe) ₃ Si ₃ AlO ₁₀ (OH,F) ₂	2,5	Mono-clinique	2,80	Très brillant Réfractaire
Kaolinite	Al ₄ [Si ₄ O ₁₀](OH) ₈	Non déterminable	Mono-clinique	2,62	Très sensible à l'eau Céramiques, ciments

Un dernier test simple, sélectif comme les précédents, est couramment pratiqué : il s'agit de la réaction avec l'acide chlorhydrique dilué ($N/10$) à froid, qui n'est positive (effervescence) que sur un seul minéral courant, la calcite CaCO_3 , selon la réaction :



Les réponses aux tests simples de minéraux usuels figurent avec leurs propriétés visuelles et leurs formules chimiques dans le tableau 1.1 à côté de leurs particularités et usages en construction.

1.1.3 Propriétés des minéraux argileux

Le terme argile est couramment défini, en mécanique des sols, par rapport à la taille des particules inférieures à $2 \mu\text{m}$. Cette définition ne correspond pas exactement à celle du géologue (voir § 1.1.3.1). Elle est par ailleurs insuffisante pour la compréhension du comportement hydromécanique des sols argileux en général, et des phénomènes de retrait et de gonflement en particulier. Il existe en outre des sols composés de particules très fines, inférieures à $2 \mu\text{m}$, mais peu argileuses au sens minéralogique (« farines de roche »). Par exemple, des « argiles sensibles » qui résultent du dépôt de ces particules peuvent être rencontrées, en particulier au Québec et dans les pays du nord de l'Europe.

1.1.3.1 Microstructure des argiles

Les argiles sont des phyllosilicates d'aluminium hydratés. Elles présentent une microstructure complexe, dont la description varie selon les auteurs. Nous avons adopté celle de D. Tessier de l'Institut national de la recherche agronomique (Inra) qui distingue plans d'anions, couches, feuilletts élémentaires, cristallites, particules et arrangement textural (Tessier, 1975, 1984).

Les plans d'anions

Les ions oxygènes et hydroxyles sont de grande taille ($13,5 \text{ nm}$ par exemple pour l'oxygène) par rapport à la plupart des cations ($4,2 \text{ nm}$ pour la silice, $5,1$ pour l'alumine). De ce fait, ce sont ces éléments qui vont conférer à la structure son aspect caractéristique.

Il existe deux arrangements possibles. L'un, valable exclusivement pour les ions oxygènes O^{2-} , est un assemblage hexagonal ; l'autre, pour les ions O^{2-} oxygènes et hydroxyles OH^- , est un assemblage compact.

Les couches

Les couches sont des empilements de deux plans. On obtient des couches de tétraèdres (couche T) en superposant une couche hexagonale et une couche compacte. Les tétraèdres sont constitués d'un cation central de silicium Si^{4+} entouré de quatre anions O^{2-} aux sommets (figure 1.3).

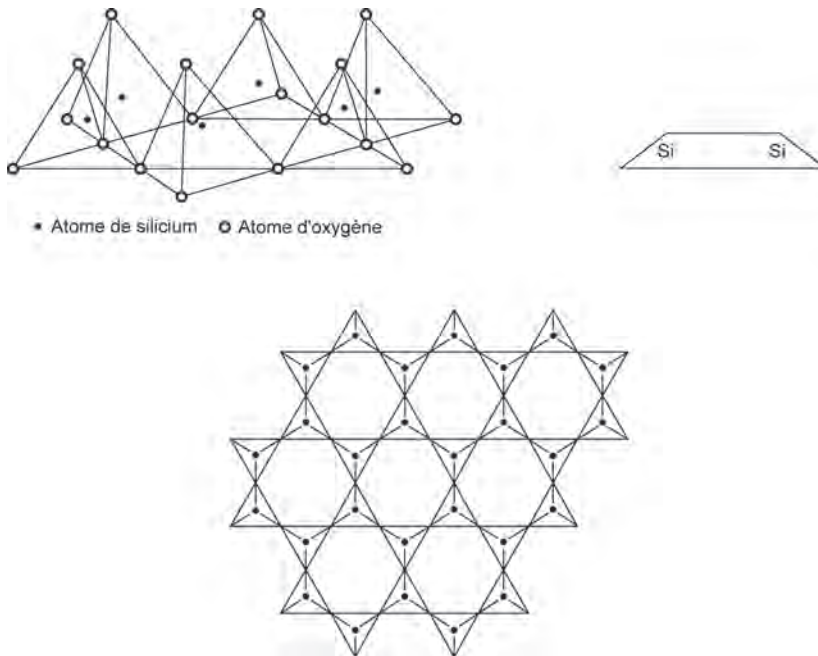


Figure 1.3. Couche tétraédrique de silice

On obtient des couches d'octaèdres (couche O) en disposant deux couches compactes l'une sur l'autre, décalées d'un rayon dans les deux directions. Les octaèdres sont constitués d'un cation aluminium Al^{3+} (ou Mg^{2+} , K^+ , Fe^{3+}), entouré de six hydroxyles OH^- (figure 1.4).

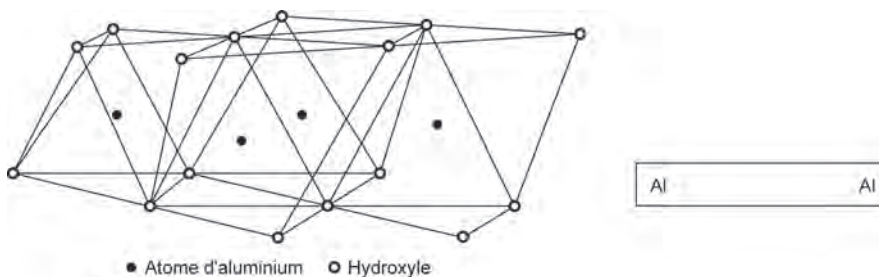


Figure 1.4. Couche octaédrique d'alumine

Les feuillets élémentaires

Les feuillets sont des superpositions de plans d'anions délimitant des couches tétraédriques et octaédriques. Les minéraux argileux sont classés en deux familles suivant le type de feuillet (figure 1.5).

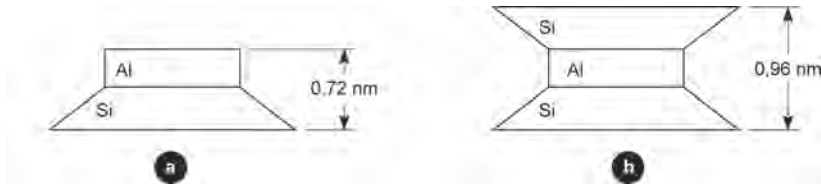


Figure 1.5. Types de feuillets des minéraux argileux

a. Schéma du feuillet 1/1. b. Schéma du feuillet 2/1.

Les feuillets 1/1 sont formés d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique (T-O), par exemple pour la kaolinite. Les feuillets 2/1 sont formés d'une couche octaédrique entourée de deux couches tétraédriques (T-O-T), par exemple pour les illites, smectites, chlorites. Les forces qui associent les éléments de chaque feuillet sont de nature ionique et sont stables.

Cristallites

Les feuillets sont très rarement isolés dans les argiles. La superposition de plusieurs feuillets forme un cristallite. On verra que les forces qui associent les feuillets successifs sont de nature variée et sont toujours moins fortes que les précédentes, ce qui permet parfois de séparer les feuillets.

Le cristallite comporte trois types de surface :

- les surfaces basales ;
- les surfaces latérales ;
- les surfaces interfeuillets.

L'ensemble formé par les surfaces basales et latérales constitue la surface externe ; les surfaces interfeuillets, quand elles sont accessibles à l'eau et aux cations hydratés, forment la surface interne.

Particule

La particule d'argile est un agrégat complexe de cristallites.

Arrangement textural

L'arrangement élémentaire des particules et des pores constitue l'arrangement textural.

Les particules s'organisent en unités morphologiques. On peut distinguer par exemple des structures floculées bord-face et des structures dispersées face-face (figure 1.6). L'arrangement textural est très divers. Il varie suivant les types d'argile et avec les conditions hydriques et physico-chimiques des sols.

L'étude de la microstructure des argiles par microscopie électronique à balayage et microscopie électronique par transmission (MEB et MET) permet de mettre en évidence les différents niveaux d'arrangement des textures.

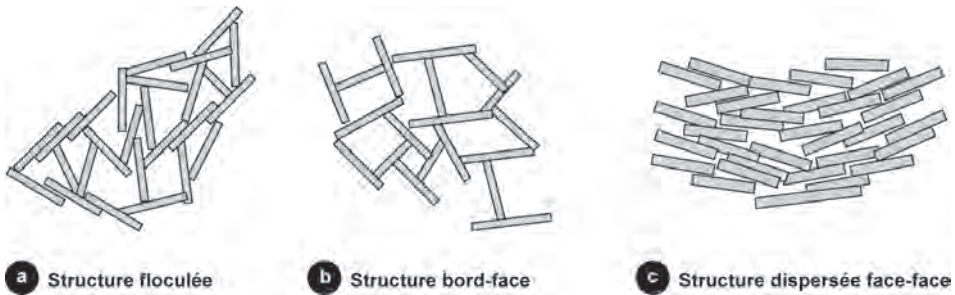


Figure 1.6. Texture des argiles

Par exemple, les images en microscopie par transmission d'une kaolinite (Vasseur *et al.*, 1995) montrent que les particules de kaolinite d'Austell sont formées par un agrégat de cristallites, eux-mêmes composés de 25 feuillet élémentaires. La figure 1.7 montre une particule formée d'agrégats de cristallites et un arrangement textural qui indique une porosité interparticulaire.

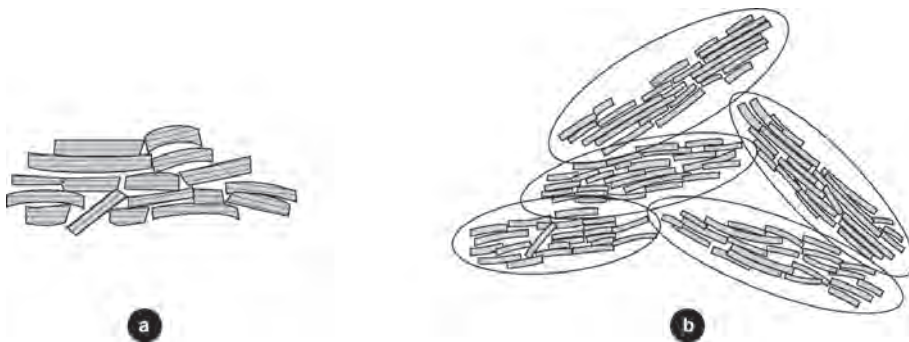


Figure 1.7. Microstructure des argiles

a. Agrégat de cristallites. b. Arrangement textural

D'après Vasseur *et al.* (1995).

La photo 1.2 permet de visualiser la microstructure d'une montmorillonite à très forte teneur en eau. L'arrangement textural est un assemblage bord à bord de particules qui constituent des rubans délimitant une porosité interparticulaire dépendant de la teneur en eau. On distinguera la porosité entre les feuillet de montmorillonite, de type interfoliaire ou intraparticulaire, et la porosité interparticulaire beaucoup plus importante.

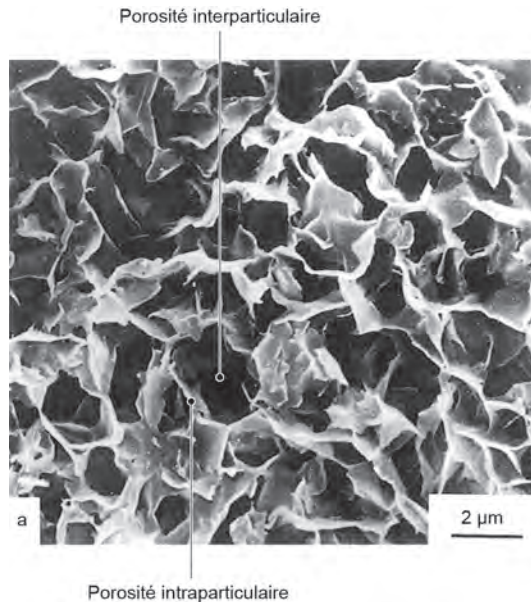


Photo 1.2. Montmorillonite à teneur en eau de 369 %

Photo MEB, D. Tessier.

1.1.3.2 Propriétés physico-chimiques des argiles

Les argiles sont soumises à des forces électrostatiques et osmotiques. Les forces électrostatiques sont présentes à la surface des feuillets, qui peuvent être chargés positivement ou négativement et attirer les molécules d'eau qui ont un comportement dipolaire.

Les forces électrostatiques proviennent de charges structurales permanentes et de charges de surface variables qui prennent naissance aux bords des feuillets.

Les charges électrostatiques structurales sont dues aux substitutions isomorphiques. Deux ions de dimension voisine peuvent se substituer l'un à l'autre sans qu'il y ait de modification fondamentale de la structure. Ces substitutions isomorphiques d'ions dans la structure des feuillets de certaines argiles créent des déficits de charges électriques qui doivent être compensés par des cations compensateurs ou cations échangeables situés dans les espaces interfoliaires. Par exemple, si on remplace dans les tétraèdres un Si^{4+} par un Al^{3+} (substitution isomorphique), des charges négatives vont apparaître sur les faces des particules (figure 1.8). Ces charges structurales sont constantes, quelles que soient les conditions physico-chimiques du milieu et toujours négatives.

Les charges électrostatiques de surface sont liées à l'hydrolyse de liens Si-O , Al-OH , le long des surfaces des feuillets. Les charges peuvent être négatives ou positives, en fonction du pH du sol.

Les forces osmotiques résultent de gradients de concentration des cations dans la phase liquide du sol.

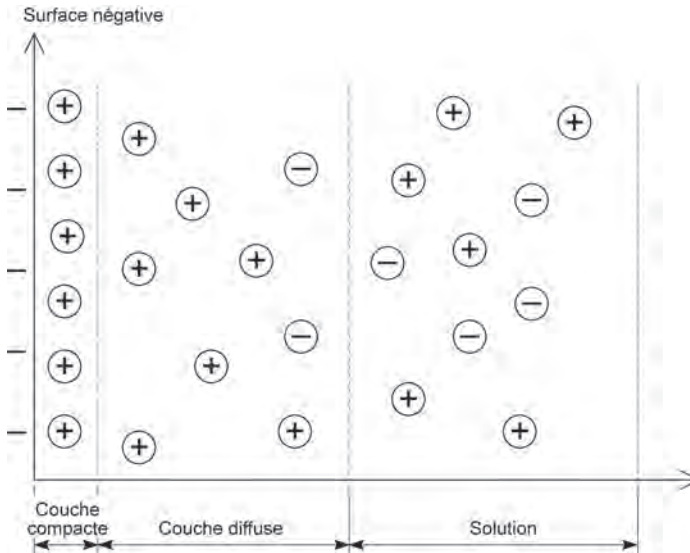


Figure 1.8. Schéma de la double couche dans le modèle de Stern

D'après Fourati (1999).

Le modèle de la double couche de Gouy-Chapman modifié par Stern rend compte de la fixation des cations et molécules d'eau dipolaires.

On considère une double couche électrique diffuse composée (voir figure 1.8) :

- d'une couche d'eau compacte, adsorbée au solide, de Stern, qui est entièrement liée à la particule par des forces électrostatiques ;
- d'une couche diffuse de Gouy et Chapman. Elle correspond à un nuage d'ions résultant de l'interaction entre l'attraction électrostatique des cations par les surfaces des particules d'argile et à la diffusion des ions qui, par des phénomènes d'osmose, auraient tendance à se distribuer de manière homogène dans l'eau. C'est cet équilibre entre les forces électrostatiques et les forces osmotiques qui conduit à la présence d'une double couche.

1.1.3.3 Étude expérimentale des caractéristiques de surface des particules d'argile

On peut obtenir les caractéristiques de surface des particules d'argile par différents essais de laboratoire. Le plus utilisé sur les chantiers est l'essai au bleu de méthylène.

Mesure de la capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique (CEC) permet de quantifier les forces électrostatiques présentes sur les surfaces et les bords des feuillets argileux ; elle représente le déficit de charge de

particules exprimé par le nombre de cations attirés à la surface de l'argile et nécessaire pour atteindre l'électroneutralité. On la définit par le nombre de milliéquivalents de cations susceptibles d'être adsorbés d'une façon réversible par 100 g de sol. On notera que la CEC totale intègre l'ensemble des charges développées à la surface des différents constituants qui composent sa phase solide. Ainsi, elle prend non seulement en compte celles développées par les argiles, mais aussi celles dues à la présence de matière organique et d'oxydes/hydroxydes. La matière organique a une très forte CEC (200-400).

Le tableau 1.2 indique les surfaces interne, externe, totale et les CEC de différents types d'argile, ainsi que celui de la matière organique.

Tableau 1.2. Valeurs de la CEC de différents types d'argile et de la matière organique

D'après Morel (1996).

Constituant	Surface interne (m ² /g)	Surface externe (m ² /g)	Surface totale (m ² /g)	CEC (meq/100 g)
Kaolinite	0	10-30	10-30	3-15
Illite	20-55	80-120	100-175	20-50
Chlorite	—	100-175	100-175	10-40
Montmorillonite	600-700	80	700-800	80-150
Vermiculite	700	40-70	760	100-150
Matière organique	—	—	—	200-400

La mesure des surfaces par physisorption

La BET (Brunauer, Emmet, Teller) mesure essentiellement la surface externe des particules argileuses. Il s'agit d'une méthode d'adsorption gazeuse (azote). Les molécules d'azote qui ne pénètrent pas entre les feuillets des argiles gonflantes se fixent uniquement sur les surfaces externes.

La mesure des surfaces par chimisorption

L'adsorption chimique permet de mesurer la surface spécifique totale. Parmi les méthodes utilisées, on citera comme adsorbat l'éthylène glycol et surtout le bleu de méthylène.

L'adsorption chimique irréversible de bleu de méthylène s'effectue avec libération équivalente de cations échangeables.

On dose par des méthodes chimiques la quantité de bleu de méthylène fixé, mais on le verra aussi beaucoup plus simplement par l'essai au bleu de méthylène à la tache (voir chapitre 5).

1.1.3.4 Principaux types d'argile

Parmi les deux cents types d'argile, on pourra rencontrer dans les sols surtout des mélanges d'argiles monominérales dont les principales sont : la kaolinite, l'illite et les smectites, dont fait partie la montmorillonite.

Kaolinite

Le feuillet élémentaire est 1/1 (T-O), le cristallite élémentaire comporte quelques dizaines de feuillets (figure 1.9). La kaolinite ne présente aucune substitution isomorphique, les charges disponibles pour la fixation de cations hydratés ne se trouvant qu'en bordure des feuillets élémentaires. N'ayant pas de substitution isomorphique, les liaisons entre feuillets sont très stables et ne laissent aucune possibilité de passage aux molécules d'eau.

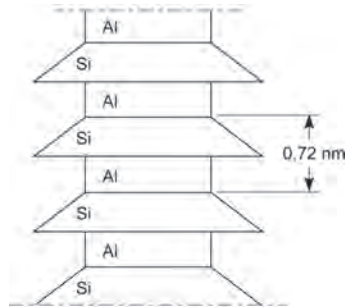


Figure 1.9. Schéma du cristallite de kaolinite

La largeur de la particule est de l'ordre de 1 μm et son épaisseur de l'ordre de 0,1 μm . La kaolinite se présente sous forme de plaquettes rigides (photo 1.3).

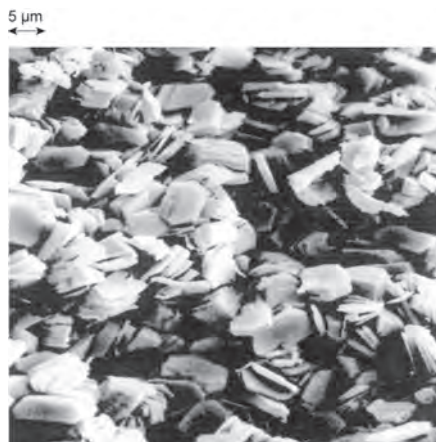


Photo 1.3. Cliché de la microstructure du kaolin d'Arvor

D'après Fourati (1999).

Illite

Le feuillet élémentaire est 2/1 (T-O-T). Dans les couches tétraédriques, un cation Si^{4+} sur quatre est remplacé par un cation Al^{3+} . Le déficit de charge qui en résulte est compensé par des ions potassiums K^+ anhydres situés entre les feuillets. Ce potassium bloque toute hydratation et expansion foliaire (figure 1.10).

Le cristallite d'illite comporte une dizaine de feuillets qui lui donne une largeur de l'ordre de $0,3\ \mu\text{m}$ et une épaisseur de l'ordre de $10\ \text{nm}$.

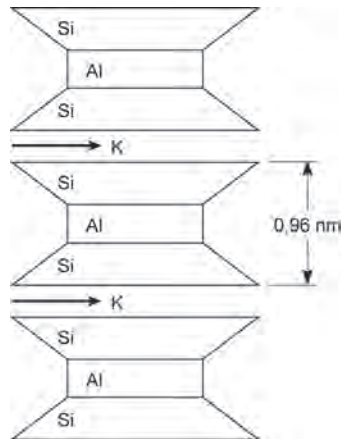


Figure 1.10. Schéma du cristallite d'illite

Smectites

La famille des smectites comprend, entre autres, la montmorillonite et la beidellite. Le terme bentonite est utilisé pour tout matériau argileux contenant au moins 60 % de montmorillonite. Le feuillet élémentaire est 2/1 (T-O-T) (figure 1.11).

Pour la montmorillonite, le déficit de charge interne aux feuillets est provoqué par des substitutions de cations Al^{3+} en couche octaédrique par des cations Mg^{2+} . Le déficit de charge qui en résulte est compensé par des cations hydratés échangeables, tels que Na^+ ou Ca^{2+} , localisés entre les feuillets (voir figure 1.11). L'épaisseur des feuillets dépendra donc de l'état d'hydratation.

Le nombre de feuillets du cristallite dépend des paramètres minéralogiques, de la nature des cations échangeables et de la concentration en sels de la solution. L'arrangement textural est un assemblage bord à bord de particules primaires qui constituent des rubans plus ou moins « chiffonnés ».

Le mécanisme de l'hydratation est dominé dans les montmorillonites par la porosité interfoliaire ou intraparticulaire et la porosité interparticulaire. La photo 1.4 montre la microstructure d'une montmorillonite Na^+ à trois teneurs en eau, 369 %, 114 % et 82 %, sous des succions

respectivement égales à 3,2 kPa, 0,1 MPa, 1 MPa. À la teneur en eau de 369 %, le diamètre des pores interparticulaires est de l'ordre de 1 à 2 μm ; pour des teneurs en eau plus faibles, on observe clairement un tassement très important des pores interparticulaires.

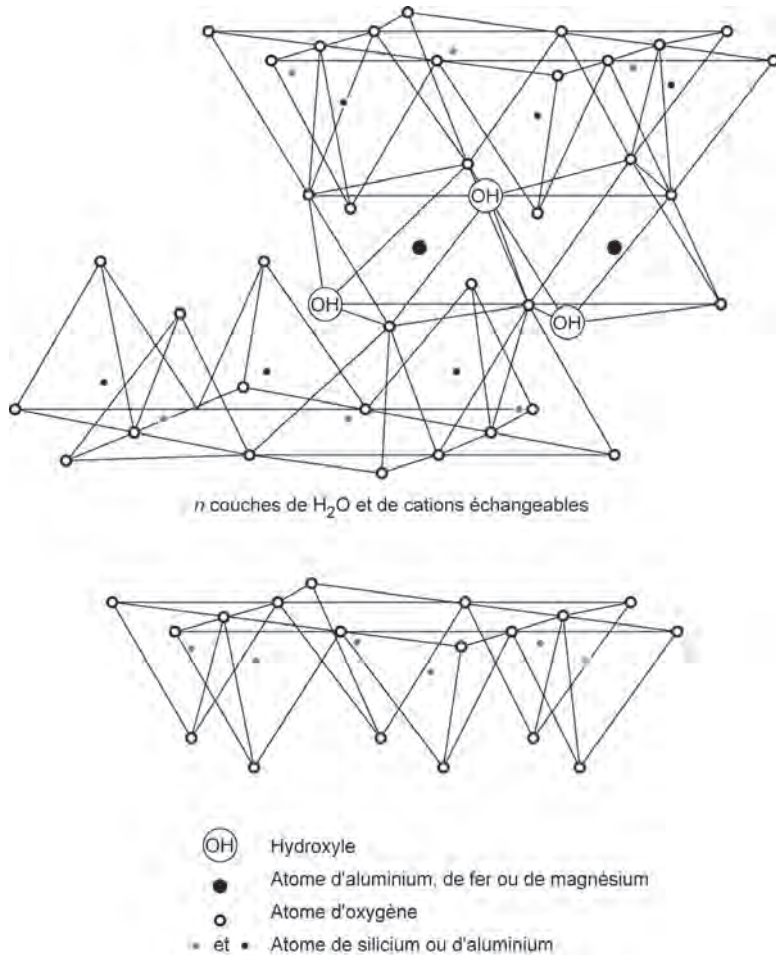
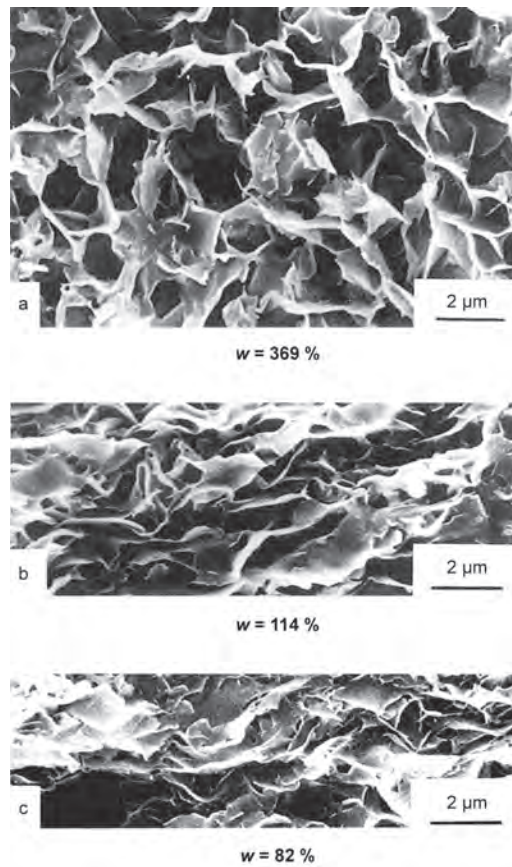


Figure 1.11. Structure du cristallite de montmorillonite

Interstratifié

Les interstratifiés sont formés par l'alternance de feuillets appartenant à deux familles d'argile différentes : illite-montmorillonite, par exemple. On en trouve une illustration dans les minéraux argileux contenus dans les argiles vertes de Romainville, qui sont représentés par de l'illite, de la kaolinite, de la montmorillonite et des interstratifiés illite-montmorillonite.



**Photo 1.4. Évolution de la microstructure d'une montmorillonite
à trois teneurs en eau**

D'après Tessier (1995).

1.1.3.5 Matériaux argileux

Dans les travaux géotechniques, il est très rare de trouver des argiles monominérales ; le sol argileux comporte presque toujours plusieurs types d'argile.

Plus généralement encore, le sol peut être composé d'argile et de fractions plus grossières : limon, sable, gravier. On considère qu'il suffit de 30 % d'argile dans un sol pour que celle-ci impose ses propriétés à l'ensemble du sol.

À taux d'argile comparable, la nature des minéraux argileux est d'une importance capitale ; on peut également considérer que 30 à 40 % de montmorillonite dans un mélange argileux sont suffisants pour que la montmorillonite confère ses caractéristiques à l'ensemble du mé-

Table des matières

Avant-propos	5
Présentation des auteurs	7
Sigles et abréviations	9
Introduction	13
Chapitre 1 Géologie des sols	23
1.1 Minéraux et roches	23
1.1.1 Définitions de base	23
1.1.1.1 Minéral	24
1.1.1.2 Cristal	24
1.1.1.3 Roche	25
1.1.2 Identification des minéraux importants	25
1.1.2.1 Pouvoir séparateur de l'œil	26
1.1.2.2 Observations simples : couleur, éclat, structure cristalline et clivages éventuels	26
1.1.2.3 Tests simples : dureté, comportement avec l'eau, réaction HCl dilué	26
1.1.3 Propriétés des minéraux argileux	28
1.1.3.1 Microstructure des argiles	28
1.1.3.2 Propriétés physico-chimique des argiles	32
1.1.3.3 Étude expérimentale des caractéristiques de surface des particules d'argile	33
1.1.3.4 Principaux types d'argile	35
1.1.3.5 Matériaux argileux	38
1.1.4 Principales familles de roches	39
1.1.4.1 Roches magmatiques	39
1.1.4.2 Roches métamorphiques	41
1.1.4.3 Roches sédimentaires	41

1.2	Les massifs rocheux	43
1.2.1	Les surfaces de discontinuité	44
1.2.1.1	Stratification	44
1.2.1.2	Diaclases	45
1.2.1.3	Faïlles	45
1.2.1.4	Schistosité	47
1.2.2	Caractérisation des surfaces de discontinuité	47
1.2.2.1	Orientation	47
1.2.2.2	Intensité de la fracturation	48
1.2.2.3	État de surface, remplissage	49
1.2.3	Influence de la structure du massif sur la morphologie et le paysage	49
1.2.3.1	Structure monoclinale	50
1.2.3.2	Structure plissée	50
1.2.3.3	Structure faillée	51
1.2.4	Les hétérogénéités des massifs (sols et roches)	51
1.2.4.1	Hétérogénéités métriques en terrain rocheux	51
1.2.4.2	Hétérogénéités métriques en massif de sol	53
1.3	Altération des roches. Formation des sols autochtones (altérites et colluvions)	54
1.3.1	Éléments de climatologie	54
1.3.1.1	Les températures	55
1.3.1.2	La pluviométrie	55
1.3.1.3	Les glaciations quaternaires	56
1.3.1.4	Le changement climatique	57
1.3.2	Processus d'altération	57
1.3.2.1	Actions mécaniques	58
1.3.2.2	Actions chimiques	59
1.3.3	Pédogenèse	59
1.3.3.1	Différents types de sols	60
1.3.3.2	Profils pédologiques	61
1.3.4	Les sols organiques	61
1.3.4.1	Les vases	62
1.3.4.2	Les tourbes	63

1.4	Les processus sédimentaires. Formation des sols allochtones (alluvions, moraines, etc.)	64
1.4.1	Les processus sédimentaires	64
1.4.2	Les milieux montagnards	65
1.4.2.1	Moraines	65
1.4.2.2	Éboulis et cônes torrentiels	66
1.4.2.3	Matériaux fluvio-glaciaires	67
1.4.3	Milieux fluviaux	68
1.4.3.1	Alluvions récentes	69
1.4.3.2	Terrasses alluviales	70
1.4.4	Milieux littoraux	71
1.4.4.1	Dunes côtières	71
1.4.4.2	Deltas	71
1.5	Les cartes géologiques	72
1.5.1	Principes de base	72
1.5.2	Légende des cartes géologiques	76
1.5.3	Édition des cartes. Échelles disponibles	77
1.5.4	La carte géologique au 1/50 000	77
1.6	Conclusion	79
1.7	Références	80
Chapitre 2 Hydrologie et niveaux d'eau dans le sol		83
2.1	Composantes du cycle hydrologique	84
2.2	La distribution des eaux	86
2.2.1	L'échelle globale : sphères, réservoirs, cycles	87
2.2.2	L'échelle continentale, régionale ou locale	89
2.3	Les systèmes hydrologiques	92
2.3.1	Limites et alimentation des systèmes hydrologiques	92
2.3.2	Débits d'écoulement des systèmes hydrologiques	94

2.4	Le bilan hydrologique	95
2.4.1	Formes possibles de l'équation du bilan	95
2.4.2	Applications nécessitant un bilan hydrologique	98
2.5	Le système [aquifère + rivière]	98
2.5.1	Relations géologiques, structurales et morphologiques	98
2.5.2	Relations hydrologiques cours d'eau-nappe alluviale	100
2.5.3	Courbe de tarissement, vidange des nappes et réserves	103
2.5.3.1	Coefficient de tarissement et capacité d'emmagasinement	104
2.5.3.2	Bilan de nappe et relation entre variation de charge et emmagasinement	106
2.5.3.3	Étude de l'indice d'emmagasinement à partir de l'hydrogramme	107
2.6	Application sur le bilan et le tarissement	107
2.7	Impact potentiel de la crue de nappe sur un bâtiment	110
2.7.1	Étude prévisionnelle du niveau des plus hautes eaux (NPHE) ...	110
2.7.2	Application : projet de fondations de bâtiment sous nappe	112
2.8	L'infiltration	116
2.8.1	Facteurs, courbes et paramètres descriptifs de l'infiltration	116
2.8.2	Évolution du profil de teneur en eau au cours d'une averse	119
2.9	Impact de l'infiltration sur les réseaux et le bâti	123
2.9.1	Les eaux claires parasites permanentes (ECP)	123
2.9.2	Infiltrabilité des eaux pluviales et cartographie	124
2.9.3	Exemple de réinjection des eaux d'exhaure	127
2.10	La remontée de nappe par cessation partielle ou totale de pompage	128
2.11	Références	133

Chapitre 3	Reconnaissance géophysique	135
3.1	Propriétés physiques utilisées	135
3.1.1	Densité	135
3.1.2	Vitesse de propagation des ondes élastiques	136
3.1.3	Propriétés électriques	140
3.1.4	Conductivité (ou résistivité) électrique	141
3.1.4.1	Milieux sans argile, loi d'Archie	142
3.1.4.2	Milieux avec argile	142
3.1.5	Permittivité diélectrique	143
3.2	Prospection gravimétrique, microgravimétrie	146
3.2.1	Principe	146
3.2.2	Champ de gravité, potentiel et accélération de la pesanteur	147
3.2.2.1	Loi de l'attraction universelle	147
3.2.2.2	Accélération de la pesanteur	148
3.2.3	Mesure de la gravité	148
3.2.4	Procédures et faisabilité de la microgravimétrie	149
3.2.5	Type de gravimètre	149
3.2.6	Implantation des points et programme des mesures	149
3.2.7	Corrections	152
3.2.7.1	Correction de dérives	152
3.2.7.2	Corrections de latitude	152
3.2.7.3	Corrections de Bouguer	153
3.2.8	Interprétation des prospections gravimétriques	154
3.2.8.1	Interprétation qualitative	155
3.2.8.2	Détermination des paramètres invariants ou limitant les solutions	157
3.2.9	Utilisation de la méthode en génie civil	158
3.2.10	Application à la recherche de vides sous voie ferrée	158
3.3	Prospection sismique	160
3.3.1	Sismique réflexion (très haute résolution en génie civil)	161
3.3.2	Sismique réfraction	165
3.3.2.1	Terrain tabulaire	165
3.3.2.2	Terrains non tabulaires	167

3.3.2.3	Application de la méthode au génie civil	169
3.3.2.4	Exemple	170
3.3.3	Tomographie sismique	171
3.3.4	Sismique en ondes de surface	171
3.4	Méthodes électriques	174
3.4.1	Principe des différentes méthodes	174
3.4.1.1	Méthode électrique	175
3.4.1.2	Méthodes électromagnétiques basse fréquence	175
3.4.1.3	Méthode électromagnétique haute fréquence	175
3.4.2	Méthode électrique	176
3.4.2.1	Principe de la mesure, le quadripôle	176
3.4.2.2	Mise en œuvre de la méthode : principes	178
3.4.2.3	Exemples	180
3.4.2.4	Interprétation des mesures	182
3.4.2.6	Multipôles mobiles	185
3.4.2.7	Réalisation des mesures	185
3.4.2.8	Application de la méthode au génie civil	186
3.4.3	Méthode électrostatique	186
3.4.3.1	Principe de la mesure	186
3.4.3.2	Application de la méthode au génie civil	187
3.4.4	Méthodes électromagnétiques basse fréquence	187
3.4.4.1	Effet de peau, profondeur de pénétration, nombre d'induction	187
3.4.4.2	Modes électromagnétiques basses fréquences	188
3.4.4.3	Sources utilisées	189
3.4.4.4	Méthodes électromagnétiques basses fréquences en champ lointain	189
3.4.4.5	Méthodes basse fréquence en champ proche	191
3.4.5	Mesures haute fréquence, radar-sol (<i>Ground Penetrating Radar</i> ou Géo-Radar) ou radar géologique	193
3.4.5.1	Principe de la méthode	193
3.4.5.2	Applications	194
3.4.5.3	Application de la méthode en génie civil	195
3.5	Synthèse de l'utilisation des méthodes	195
3.6	Références	199

Chapitre 4	Reconnaissance géologique	201
4.1	Les forages géologiques	202
4.1.1	Moyens de reconnaissance	202
4.1.1.1	Le sondage carotté	202
4.1.1.2	Le forage destructif avec diagraphies instantanées	202
4.1.1.3	Le passage de caméra en forage	203
4.1.1.4	Les pénétromètres	203
4.1.1.5	Les tarières	203
4.1.1.6	Les sondages à la pelle	203
4.1.1.7	Les puits blindés	203
4.1.2	Les foreuses	204
4.1.2.1	Les sondeuses de reconnaissance	204
4.1.2.2	Les foreuses de production	206
4.1.3	Les tubages	207
4.1.4	Les fluides de perforation	207
4.1.5	Les outils du forage rotatif	208
4.1.5.1	Les carottiers	208
4.1.5.2	Les outils désagréateurs (ou « destructifs ») en rotation simple	213
4.1.6	Matériel de forage en rotopercussion	216
4.1.7	Incidents de carottage	216
4.1.7.1	Perte d'eau ou du fluide de forage	216
4.1.7.2	Grippage de l'ensemble mobile	216
4.1.7.3	Récupération nulle	216
4.1.7.4	Chute d'outil et avance rapide	217
4.1.7.5	Problèmes particuliers en cas de présence de cavités ...	217
4.1.8	Exploitation et présentation du carottage	217
4.1.8.1	Contrôle de qualité des carottes	217
4.1.8.2	Les caisses de carottes	217
4.1.9	Les sondages pénétrométriques	221
4.2	Les diagraphies instantanées en forage	221
4.2.1	Introduction	221
4.2.2	Les principaux types d'appareils – Principe de fonctionnement des matériels	222

4.2.3	Les variables intervenant sur le paramètre de vitesse d'avancement de l'outil de forage rotatif	224
4.2.3.1	La pression sur l'outil et la vitesse de rotation	225
4.2.3.2	La pression du fluide d'injection	226
4.2.3.3	La nature de l'outil : type, diamètre, degré d'usure	226
4.2.4	Forage en rotoperçussion	228
4.2.5	Applications	228
4.2.5.1	Détection de vides francs et de cavités	228
4.2.5.2	Altération des sols et des roches, contrôle de la validité des essais mécaniques en place	229
4.2.5.3	Lithostratigraphie	231
4.2.5.4	Contrôle d'amélioration de terrains	231
4.2.5.5	Contrôle de la qualité des couches situées au-dessus de cavités	231
4.2.6	Conclusion	232
4.3	Les diagraphies nucléaires	234
4.3.1	Les diagraphies de radioactivité naturelle (RAN)	234
4.3.1.1	Le principe	234
4.3.1.2	Les compteurs	234
4.3.1.3	Les mesures de radioactivité naturelle	234
4.3.1.4	Utilisation de la RAN globale	235
4.3.2	Diagraphies gamma-gamma et neutron-neutron	241
4.3.2.1	Principes des méthodes	241
4.3.2.2	Mise en œuvre, limites de la méthode	241
4.3.2.3	Intérêt des diagraphies gamma-gamma et neutron-neutron	242
4.4	Références	244
Chapitre 5 Identification et classification des sols		245
5.1	Définitions du modèle élémentaire de sol	247
5.2	Identification des sols	251
5.2.1	Paramètres de nature	251
5.2.1.1	La granularité	252

5.2.1.2	L'argilosité	255
5.2.1.3	Détermination de la masse volumique des particules	264
5.2.1.4	Détermination des masses volumiques minimale et maximale des sols non cohérents	264
5.2.1.5	Constituants minéraux et organiques	265
5.2.2	Paramètres d'état	267
5.2.2.1	Détermination de la teneur en eau pondérale	267
5.2.2.2	Détermination de la masse volumique totale des sols en laboratoire	267
5.2.2.3	Détermination de la masse volumique du sol en place ..	268
5.3	Dénomination des sols	268
5.3.1	Critères principaux	268
5.3.1.1	La granularité	268
5.3.1.2	La teneur en carbonates	271
5.3.1.3	La teneur en matières organiques	271
5.3.2	Les qualificatifs	271
5.3.2.1	L'activité de bleu de la fraction argileuse	272
5.3.2.2	La plasticité et l'indice de consistance	272
5.3.2.3	La compacité	273
5.3.2.4	La densité	273
5.4	Valeurs repères	274
5.5	Classification des sols	277
5.5.1	La classification géotechnique des sols des LPC (Ifsttar)	278
5.5.2	La classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme	280
5.5.2.1	Utilisation des sols et des roches dans les remblais et les couches de forme	280
5.5.2.2	Classification des sols	282
5.5.2.3	Classification des matériaux rocheux	292
5.5.2.4	Classification des sols organiques et des sous-produits industriels	295
5.6	Références	295

Chapitre 6	Déplacements et déformations des massifs de sol	297
6.1	Domaines d'étude	298
6.2	Illustrations des déplacements et des déformations d'un massif de sol	299
6.3	Déplacements et déformations d'un domaine élémentaire en coordonnées cartésiennes	303
6.3.1	Description du mouvement du massif de sol	303
6.3.2	Études des petits déplacements rigides : translation et rotation d'ensemble	305
6.3.2.1	Translation d'ensemble (rigide)	305
6.3.2.2	Rotation d'ensemble (rigide)	306
6.3.3	Étude de la déformation infinitésimale	308
6.3.3.1	Définition du vecteur déformation	309
6.3.3.2	Les dilatations en coordonnées cartésiennes	310
6.3.3.3	Les glissements en coordonnées cartésiennes	312
6.3.4	Conclusions sur les déplacements et les déformations du massif de sol ou d'un élément de structure	313
6.3.5	Dilatations et directions principales du tenseur de déformations infinitésimales	316
6.3.6	Dilatation cubique en déformations infinitésimales	320
6.3.7	Décomposition du tenseur de déformations infinitésimales en partie sphérique et déviatorique	320
6.3.8	Généralités sur la représentation géométrique du tenseur de déformations infinitésimales	320
6.3.9	Représentation géométrique du tenseur de déformation infinitésimale dans les axes fixes principaux X_1, X_2, X_3 . Représentation de Lamé	321
6.3.10	Représentation géométrique du tenseur de déformations infinitésimales dans les axes liés λ, g . Représentation de Mohr	322

6.4. Déplacements et déformations d'un domaine élémentaire en coordonnées cylindriques	330
6.4.1 Définitions des composantes du déplacement	330
6.4.2 Définitions des composantes du tenseur de déformation dans le cas tridimensionnel	331
6.4.3 Définitions des composantes du tenseur de déformation en déformation plane	332
6.4.4 Définitions des composantes du tenseur de déformation en déformation plane et en axisymétrie	333
6.4.5 Dilatation cubique en déformations infinitésimales	335
6.5 Application	335
6.5.1 Déformation plane	336
6.5.2 Déformations principales et directions principales analytiquement	336
6.5.2.1 Déformations principales	336
6.5.2.2 Directions principales	336
6.5.3 Déformations principales et directions principales par le cercle de Mohr	337
6.6 Références	338
Chapitre 7 Contraintes dans les massifs de sols	339
7.1 Notion de contrainte. Définition du vecteur contrainte	340
7.1.1 Vecteur contrainte	340
7.1.2 Contraintes orthogonales en un point	342
7.1.3 Tenseurs des contraintes en contraintes cartésiennes	343
7.2 Équations d'équilibre	347
7.2.1 Équations d'équilibre en coordonnées cartésiennes	347
7.2.1.1 Déformation plane	347
7.2.1.2 Cas tridimensionnel	348
7.2.2 Équations d'équilibre en coordonnées cylindriques	348
7.2.2.1 Déformation plane	348
7.2.2.2 Cas tridimensionnel	350
7.2.2.3 Déformation plane et chargement de révolution	351

7.2.3	Expression tensorielle de l'équation d'équilibre	352
7.3	Étude locale du tenseur de contraintes	353
7.3.1	Contrainte normale et contrainte tangentielle	353
7.3.2	Réciprocité des contraintes	354
7.3.3	Contraintes et directions principales du tenseur de contraintes ..	355
7.3.4	Décomposition du tenseur de contraintes en partie sphérique et déviatorique	357
7.3.5	Contraintes octaédriques	358
7.3.6	Applications aux calculs des contraintes dans le sol	358
7.3.6.1	Massif semi-infini à surface horizontale soumis aux forces de pesanteur	358
7.3.6.2	Massif semi-infini à surface inclinée soumis aux forces de pesanteur	360
7.3.7	Généralités sur la représentation géométrique du vecteur contrainte	362
7.3.7.1	Représentation géométrique du vecteur contrainte $\underline{t}(n)$ dans les axes fixes principaux X_1, X_2, X_3 . Représentation de Lamé	362
7.3.7.2	Représentation géométrique du vecteur contrainte $\underline{t}(n)$ dans les axes liés σ, τ à la facette. Représentation de Mohr	363
7.4	Sols saturés. Contraintes effectives et postulat de Terzaghi	381
7.4.1	Chargement d'un massif de gravier saturé	381
7.4.2	Postulat de Terzaghi	382
7.4.3	Application au sol grenu saturé	383
7.5	Sols non saturés. Succion dans les sols	383
7.5.1	Différents types de succion	384
7.5.1.1	Succion capillaire dans les sols granulaires	384
7.5.1.2	Succion physico-chimique dans les sols fins	384
7.5.1.3	Succion matricielle	386
7.5.2	Relation entre la succion, le degré de saturation, la teneur en eau, l'indice des vides	386

7.5.3	Domaines de non-saturation	389
7.5.4	Choix de variables de contrainte	393
7.5.5	Techniques de mesure de succion	394
7.5.5.1	Mesure par translation d'axes	394
7.5.5.2	Mesure par technique osmotique	395
7.5.5.3	Mesure par phase vapeur	395
7.5.5.4	Mesure par tensiométrie	396
7.5.5.5	Mesure par psychrométrie	396
7.5.5.6	Mesure par papier-filtre	397
7.6	Références	398
Chapitre 8 Consolidation et fluage des sols		401
8.1	Présentation du couplage hydromécanique des sols saturés	401
8.1.1	État initial	403
8.1.2	Loi de comportement	403
8.2	Consolidation et fluage des sols saturés	403
8.2.1	Présentations de la consolidation et du fluage	403
8.2.2	Consolidation unidimensionnelle	404
8.2.2.1	Définition de la consolidation	404
8.2.2.2	Application de la consolidation unidimensionnelle au tassement d'une couche d'argile molle	406
8.3	Courbes œdométriques	407
8.3.1	Définitions des courbes œdométriques	407
8.3.2	Différents états initiaux du sol	410
8.3.3	Détermination de la contrainte de préconsolidation	412
8.3.4	Différents paramètres de l'essai œdométrique	412
8.4	Calculs du tassement unidimensionnel de consolidation	414
8.4.1	Cas du sol normalement consolidé	414
8.4.2	Cas du sol surconsolidé	416

8.4.3 Applications	417
8.5 Estimation du temps de consolidation unidimensionnel	419
8.5.1 Équation de la consolidation	419
8.5.2 Coefficients de consolidation	420
8.5.3 Détermination des isochrones	422
8.5.4 Calcul du temps de tassement	424
8.5.5 Application	426
8.6 Consolidation bidimensionnelle	427
8.7 Fluage	432
8.7.1 Phénomène de fluage du sol	432
8.7.2 Modèles élémentaires unidimensionnels de fluage du sol	433
8.7.2.1 Description de la viscosité	433
8.7.2.2 Modèle viscoélastique de Maxwell	434
8.7.2.3 Modèle viscoélastique de Kelvin-Voigt	435
8.7.2.4 Modèle viscoplastique de Bingham	437
8.7.2.5 Autres modèles	438
8.7.3 Effet du fluage sur la valeur de la pression de préconsolidation	440
8.7.3.1 Réseau des « lignes de temps » de Bjerrum	440
8.7.3.2 Calcul de la pression de préconsolidation en fonction de la durée de chargement	442
8.7.4 Effet du fluage sur la surface de charge	444
8.7.5 Paramètres des lois de fluage	445
8.7.6 Calcul pratique du tassement de fluage d'un massif de sol	445
8.7.7 Application	446
8.8 Valeurs indicatives des caractéristiques de consolidation et de fluage de sols fins	449
8.9 Corrélations pour un site géographique donné	450
8.10 Références	451

Chapitre 9	Généralités sur les lois de comportement des sols	453
9.1	Historique des lois de comportements des sols	453
9.1.1	Première période : le sol, matériau monophasique	453
9.1.2	Deuxième période : le sol, matériau biphasique	454
9.1.3	Troisième période : le sol, matériau triphasique	454
9.1.4	Exemple d'études de comportement de sols	454
9.1.5	Comportement des sols suivant leur état de saturation	455
9.2	Généralités sur le comportement des matériaux	456
9.2.1	Étude du comportement de l'acier doux	456
9.2.2	Étude du comportement de l'acier écroui	458
9.2.3	Étude du comportement du sol saturé par l'essai œdométrique et l'essai triaxial	460
9.2.3.1	Essais triaxiaux sur des éprouvettes de sol saturé. Essais drainés	462
9.2.3.2	Essais triaxiaux sur des éprouvettes de sol saturé. Essais non drainés	463
9.2.4	Chemins de contraintes des essais triaxiaux de révolution	464
9.2.4.1	Chemin de contraintes dans les axes de Mohr	464
9.2.4.2	Chemin de contraintes dans les axes de Cambridge	465
9.2.4.3	Chemin de contraintes dans les axes de Lambe	466
9.3	Établissement des lois de comportement du squelette du sol	468
9.3.1	Généralités sur les lois de comportement	468
9.3.2	Établissement des lois élastoplastiques	469
9.3.2.1	Surfaces de charge et domaines d'élasticité actuels	470
9.3.2.2	Règles d'écoulement plastique. Lois de déformation plastique	472
9.4	Références	474

Chapitre 10	Lois de comportement élastique parfaitement plastique et modèle hyperbolique	477
10.1	Loi de comportement élastique linéaire	479
10.1.1	Modules et coefficient d'élasticité	480
10.1.1.1	Compression simple ou traction simple	480
10.1.1.2	Cisaillement simple	481
10.1.1.3	Compression isotrope	482
10.1.2	Loi de Hooke	483
10.1.3	Élasticité plane	484
10.1.3.1	Déformation plane	484
10.1.3.2	Contrainte plane (ou quasi plane)	485
10.1.4	Applications aux calculs des tubes épais	486
10.1.4.1	Calculs des déplacements et des contraintes dans le cas général	487
10.1.4.2	Cas de la pression intérieure seule P_i	488
10.1.4.3	Cas de la pression extérieure seule P_e	489
10.1.4.4	Cas du tube de rayon intérieur infiniment petit soumis à une pression extérieure P_e	490
10.1.4.5	Cas du tube mince	491
10.1.5	Formules et abaques de distribution des contraintes dans le sol dues à certains types de surcharges	491
10.1.5.1	Diffusion d'une force ponctuelle unique P appliquée à la surface du sol	491
10.1.5.2	Charge répartie sur une aire finie à la surface du sol	493
10.1.5.3	Charge appliquée par un remblai infiniment long	498
10.1.5.4	Distribution des contraintes dans un angle solide	500
10.1.6	Détermination et choix du module d'élasticité E	504
10.1.7	Détermination du coefficient de Poisson	505
10.1.8	Détermination du module d'élasticité E_u et du coefficient de Poisson ν	506
10.2	Loi de comportement élastique parfaitement plastique	507
10.2.1	Critère de plasticité de Mohr-Coulomb	507
10.2.1.1	Détermination de c et ϕ dans les axes de Mohr	510
10.2.1.2	Détermination de c et ϕ dans les axes de Cambridge	511

10.2.1.3	Détermination de σ_c et c dans les axes de Lambe ...	512
10.2.1.4	Détermination de l'angle de dilatance	513
10.2.2	Critère de plasticité de Tresca	514
10.2.2.1	Détermination de c_u dans les axes de Lambe	515
10.2.2.2	Détermination de c_u dans les axes de Mohr	516
10.2.2.3	Détermination de c_u	517
10.3	Modèle hyperbolique de type élastoplastique avec écrouissage .	518
10.4	Modélisation d'essais triaxiaux drainés	521
10.5	Références	522
Chapitre 11 Lois élastoplastiques avec écrouissage		
	de Cam-Clay	523
11.1	Comportement des argiles idéales reconstituées et saturées dans le domaine normalement consolidé. Notion d'état critique	523
11.1.1	Compression isotrope	523
11.1.2	Essais triaxiaux dans le domaine normalement consolidé	526
11.2	Comportement des argiles idéales reconstituées et saturées, dans le domaine surconsolidé. Notion de surface de charge	531
11.3	Modèle de Cam-Clay modifié	532
11.3.1	Description du modèle de Cam-Clay modifié	532
11.3.2	Applications du modèle de Cam-Clay modifié à l'interprétation des essais triaxiaux sur des argiles	537
11.3.2.1	Essai triaxial de compression, avec consolidation isotrope, drainé, CID, d'une argile reconstituée saturée normalement consolidée	538
11.3.2.2	Essai triaxial de compression, avec consolidation isotrope, non drainé, CIU, d'une argile reconstituée saturée normalement consolidée	539
11.3.2.3	Essai triaxial de compression, avec consolidation isotrope, drainé, CID, d'une argile reconstituée saturée légèrement surconsolidée	539

11.3.2.4	Essai triaxial de compression, avec consolidation isotrope, non drainé, CIU, d'une argile reconstituée saturée légèrement surconsolidée	540
11.3.2.5	Essai triaxial de compression, avec consolidation isotrope, drainé, CID, d'une argile reconstituée saturée fortement surconsolidée	541
11.3.2.6	Essai triaxial de compression, avec consolidation isotrope, non drainé, CIU, d'une argile reconstituée saturée fortement surconsolidée	542
11.3.2.7	Exploitation des essais triaxiaux sur des argiles saturées naturelles	543
11.3.2.8	Déterminations expérimentales de la surface de charge et de l'état critique des argiles naturelles .	544
11.4	Références	549
Chapitre 12 Comportement des sols non saturés		551
12.1	Effet de la succion sur la compressibilité	551
12.2	Effet de la succion sur la résistance au cisaillement	553
12.2.1	Influence de la succion	553
12.2.2	Influence de la contrainte de confinement	554
12.3	Angle de frottement et cohésion apparents	556
12.4	Influence de la succion sur la surface de charge	556
12.5	Phénomène de gonflement et d'effondrement	557
12.6	Déformation plastique due à la succion	558
12.7	Couplage succion-contrainte (ou pression de préconsolidation)	559
12.8	Lois de comportement	561
12.8.1	Généralités	561
12.8.2	Modèles élastiques	564
12.8.3	Modèles élastoplastiques	564
12.9	Références	571

Chapitre 13	Hydraulique des sols	573
13.1	Équations générales de la mécanique des fluides	573
13.2	Équation de continuité en milieu poreux	575
13.2.1	Notion de volume élémentaire représentatif	575
13.2.2	Vitesse de filtration, continuité macroscopique	576
13.2.3	Terme source	578
13.3	Équation de Navier-Stokes – milieux poreux modèles	578
13.3.1	Simplifications	579
13.3.2	Cas d'un tube cylindrique	579
13.4	Le théorème de Bernoulli	580
13.4.1	Énoncé	580
13.4.2	Démonstration	581
13.4.3	Principe du manomètre	582
13.4.4	Application : loi de Torricelli	583
13.5	Charge hydraulique	584
13.5.1	Écoulement laminaire d'un fluide visqueux	584
13.5.2	Écoulement laminaire dans un tube et perte de charge	584
13.5.3	Charge et gradient hydraulique, isopièzes	585
13.5.4	Description de l'écoulement par les courbes isopièzes	589
13.5.5	Application à un ouvrage géotechnique : le batardeau	592
13.6	La loi de Darcy (1856)	594
13.6.1	L'expérience de Darcy et le coefficient de perméabilité	594
13.6.2	Perméabilité intrinsèque	595
13.6.3	Relations entre perméabilité intrinsèque et porosité	597
13.6.3.1	Hazen (1911) / Taylor (1948)	597
13.6.3.2	Terzaghi (1925)	598
13.6.3.3	Kozeny (1927) / Carman (1937)	598
13.6.4	Application : écoulement d'une nappe libre vers un canal	599

13.7	Généralisation de la loi de Darcy	600
13.7.1	Tenseur de perméabilité	600
13.7.2	Transmissivité	602
13.8	Limites de validité de la loi de Darcy	604
13.8.1	Gradients faibles	604
13.8.2	Gradients forts	605
13.8.3	Régime transitoire	605
13.9	Équation générale de l'écoulement en milieu saturé	605
13.10	Étude des réseaux d'écoulement : cas unidimensionnel	608
13.10.1	Sol homogène	608
13.10.2	Multicouche	609
13.10.2.1	Écoulement vertical	609
13.10.2.2	Écoulement horizontal	610
13.11	Étude des réseaux d'écoulement : cas bidimensionnel	611
13.11.1	Conditions aux limites	612
13.11.1.1	Condition de Neumann, flux imposé	612
13.11.1.2	Condition de Dirichlet, potentiel imposé	613
13.11.1.3	Condition de surface libre et de suintement	613
13.11.2	Méthode graphique de tracé du réseau d'écoulement : cas du batardeau	614
13.11.3	Méthode numérique du tracé du réseau d'écoulement : cas du batardeau	616
13.11.4	Méthode numérique de tracé du réseau d'écoulement pour une fouille blindée dans un monocouche	617
13.11.5	Écoulement de l'eau dans un batardeau le long d'un écran dans une couche de sol infinie. Solution de Mandel	620
13.11.6	Écoulement dans un batardeau le long d'un écran dans une couche de sol limitée par un substratum imperméable. Solution de Mandel	621
13.11.7	Abaques de Davidenkoff pour un batardeau	622

13.12	Rupture du fond de fouille d'origine hydraulique	624
13.12.1	Soulèvement hydraulique global du terrain	625
13.12.2	Forces hydrodynamiques exercées par l'écoulement de l'eau sur les grains, boullance	625
13.12.3	Érosion interne et régressive	627
13.13	Hydraulique des sols non saturés	628
13.14	Références	632
Chapitre 14	Essais de laboratoire	635
14.1	L'essai œdométrique	635
14.1.1	Sol non gonflant	637
14.1.2	Sol gonflant	639
14.1.3	Application	640
14.1.4	Détermination du coefficient de consolidation verticale	641
14.1.4.1	Méthode de Taylor	641
14.1.4.2	Méthode de Casagrande	643
14.1.4.3	Méthode à partir de la mesure du coefficient de perméabilité verticale	643
14.1.4.4	Détermination des paramètres de fluage	649
14.2	Essais de cisaillement à l'appareil triaxial	650
14.2.1	Essais de cisaillement à l'appareil triaxial	650
14.2.2	Appareil triaxial	650
14.2.3	Description de l'essai	652
14.2.4	Exploitation des résultats de l'essai	654
14.2.5	Différents types d'essais	654
14.2.5.1	Essai UU (<i>unconsolidated undrained</i>)	654
14.2.5.2	Essai CD (<i>consolidated drained</i>) sur sols saturés	655
14.2.5.3	Essai CU + <i>u</i> (<i>consolidated undrained</i>) avec mesure de <i>u</i> sur sols saturés	656
14.3	Essais de cisaillement rectiligne à la boîte	667
14.3.1	Description de l'essai	668
14.3.2	Exploitation des résultats de l'essai	668

14.4	Essais de laboratoire sur sols non saturés	671
14.5	Références	673
Chapitre 15 Essais <i>in situ</i>		675
15.1	Essai pressiométrique Ménard	676
15.1.1	Domaine d'application	676
15.1.2	Principe de l'essai	676
15.1.3	Appareillage	676
15.1.3.1	Contrôleur pression-volume	677
15.1.3.2	Sondes	677
15.1.3.3	L'enregistreur	678
15.1.4	Réalisation du sondage pressiométrique	678
15.1.4.1	Forage pressiométrique	678
15.1.4.2	Essai pressiométrique	678
15.1.5	Expression des résultats	681
15.1.5.1	Analyse théorique de l'essai pressiométrique	681
15.1.5.2	Courbe pressiométrique corrigée	683
15.1.5.3	Détermination du module pressiométrique Ménard ..	683
15.1.5.4	Détermination de la pression de fluage	684
15.1.5.5	Détermination de la pression limite	684
15.1.5.6	Pression limite pressiométrique nette, pression de fluage pressiométrique nette	685
15.1.5.7	Qualités nécessaires à l'exécution d'un essai pressiométrique	685
15.1.5.8	Exemple de dépouillement d'un essai pressiométrique	687
15.1.5.9	Exemple de sondage pressiométrique	687
15.1.5.10	Ordre de grandeur des pressions limites	687
15.2	Essai de pénétration statique	690
15.2.1	Domaine d'application	690
15.2.2	Principe de l'essai	694
15.2.3	Appareillage	692
15.2.4	Réalisation de l'essai de pénétration statique	696

15.2.5	Expression des résultats	696
15.2.6	Classification des sols d'après le pénétromètre statique CPT	696
15.2.7	Ordre de grandeur des résistances de pointe	699
15.3	Essais de pénétration statique au piézocône	701
15.3.1	Domaine d'application	701
15.3.2	Principe de l'essai	701
15.3.3	Appareillage	702
15.3.4	Réalisation de l'essai au piézocône	702
15.3.5	Expression des résultats	703
15.3.6	Classification des sols d'après le piézocône CPTU	704
15.3.7	Estimation du coefficient local de perméabilité horizontale	706
15.4	Essai de cisaillement (sur site) au phicomètre	709
15.4.1	Domaine d'application	709
15.4.2	Principe de l'essai	709
15.4.3	Appareillage	710
15.4.4	Réalisation de l'essai	710
15.4.5	Expression des résultats	711
15.5	Pénétromètres dynamiques de reconnaissance	712
15.5.1	Pénétromètre dynamique A	712
15.5.1.1	Principe de l'essai	712
15.5.1.2	Domaine d'application	713
15.5.1.3	Appareillage	713
15.5.1.4	Réalisation de l'essai	713
15.5.1.5	Expression des résultats	713
15.5.2	Pénétromètre dynamique B	714
15.5.2.1	Principe de l'essai	714
15.5.2.2	Domaine d'application	714
15.5.2.3	Appareillage	714
15.5.2.4	Réalisation de l'essai	714
15.5.2.5	Expression des résultats	714

15.6	Pénétromètres dynamiques de contrôle de compactage	717
15.6.1	Pénétromètre à énergie constante	717
15.6.2	Pénétromètre à énergie variable	720
15.7	Essai de pénétration au carottier	722
15.7.1	Principe de l'essai	722
15.7.2	Domaine d'application	722
15.7.3	Appareillage	722
15.7.4	Réalisation de l'essai	723
15.7.5	Expression des résultats	723
15.8	Essai scissométrique	723
15.8.1	Principe de l'essai	723
15.8.2	Domaine d'application	723
15.8.3	Appareillage	724
15.8.4	Réalisation de l'essai	724
15.8.5	Expression des résultats	725
15.9	Effet de la non-saturation sur les résultats d'essai <i>in situ</i>	726
15.10	Recommandation pour le choix des essais mécaniques pour le dimensionnement des ouvrages géotechniques	729
15.11	Références	729
Chapitre 16 Aquifères, nappes et essais d'eau		731
16.1	Définitions	731
16.2	Typologie des systèmes aquifères et des nappes	733
16.2.1	Nappes libres	733
16.2.1.1	Nappe de littoral	733
16.2.1.2	Nappe alluviale	734
16.2.1.3	Nappe de vallée ou nappe soutenue	735
16.2.1.4	Nappe non soutenue et nappe perchée	736
16.2.1.5	Types de sources des nappes libres	738
16.2.2	Nappes captives	738

16.2.3	Coupe type d'une nappe mixte dans la direction de l'écoulement	740
16.2.4	Les nappes des aquifères hétérogènes	741
16.2.4.1	Régions de socle	741
16.2.4.2	Régions de plateaux calcaires karstiques	742
16.2.4.3	Régions de bassins sédimentaires : aquifère multicouche	744
16.2.5	Ordres de grandeur des vitesses d'écoulement des nappes..	746
16.3	L'équation de diffusivité	746
16.3.1	Introduction	746
16.3.2	Nappe libre, nappe captive : emmagasinement	747
16.3.2.1	Porosité efficace ou de drainage	748
16.3.2.2	Nappe libre	750
16.3.2.3	Nappe captive	751
16.3.3	L'équation de la diffusivité dans une nappe libre	754
16.3.4	L'équation de la diffusivité dans une nappe captive.....	757
16.35	Nappe complexe : libre ou captive selon le lieu	758
16.4	Conditions aux limites	759
16.4.1	Limite à potentiel imposé	759
16.4.2	Limite à flux imposé	760
16.4.3	Condition de Fourier	763
16.4.4	Condition de surface libre	764
16.4.5	Condition de surface de suintement	765
16.4.6	Absence de condition aux limites	766
16.5	Les mesures piézométriques	766
16.5.1	Principe et recommandations	766
16.5.1.1	Principe	766
16.5.1.2	Recommandations	767
16.5.2	Les piézomètres à tube ouvert	768
16.5.2.1	Technologie	768
16.5.2.2	Temps de réponse et mesure piézométrique	769
16.5.3	Les capteurs de pression interstitielle	770

16.6	Les mesures ponctuelles de perméabilité <i>in situ</i>	773
16.6.1	L'essai de poche, ou essai Lefranc	774
16.6.1.1	Principe de l'essai de poche	774
16.6.1.2	Signification du régime permanent	775
16.6.1.3	Facteur m de forme et de position	776
16.6.1.4	Application sur l'interprétation des mesures en régime transitoire	777
16.6.2	Essai Lefranc à débit nul en terrain de faible perméabilité	783
16.6.2.1	Essai d'absorption après injection initiale	783
16.6.2.2	Essai de remontée après pompage initial	784
16.6.3	Le micromoulinet	784
16.6.3.1	Circulations d'eau verticales dans un forage	784
16.6.3.2	Les mesures au micromoulinet et leur interprétation	786
16.7	Les essais de pompage et la diffusivité : introduction	788
16.7.1	Cône de dépression et types d'essais	788
16.7.2	Propriétés de l'équation de la diffusivité	792
16.7.2.1	Unicité de la solution et principe de superposition ..	793
16.7.2.2	Anisotropie et perméabilité isotrope équivalente	793
16.7.2.3	Écoulement parallèle en régime permanent	794
16.8	Solutions 2D en écoulement permanent radial	794
16.8.1	Puits dans une nappe captive : solution de Dupuit	794
16.8.2	Puits dans une nappe libre	796
16.8.3	Couple de puits : principe des images	800
16.8.3.1	Cas d'une limite rectiligne à potentiel imposé	800
16.8.3.2	Cas d'une limite rectiligne étanche (<i>i.e.</i> à flux nul) .	802
16.9	Courbe caractéristique d'un puits	803
16.9.1	Mise en œuvre d'un essai de puits	803
16.9.2	Exécution des paliers de débit	803
16.9.3	Signification du rabattement et pertes de charge	804
16.9.4	Interprétation graphique de l'essai de puits	806

16.10	L'essai de nappe	807
16.10.1	Solution élémentaire en écoulement radial transitoire	807
16.10.1.1	Introduction	807
16.10.1.2	La solution de Theis	808
16.10.1.3	L'approximation logarithmique de Jacob pour les essais de longue durée	811
16.10.1.4	Relation avec le régime permanent	812
16.10.1.5	Application du principe de superposition	813
16.10.2	Interprétation d'un essai de nappe ou essai de pompage	814
16.10.2.1	Méthode de Jacob	815
16.10.2.2	Formule de Theis complète : la méthode d'identification	817
16.10.2.3	Interprétation de la courbe de remontée	819
16.10.2.4	Bilan des résultats obtenus par différentes méthodes	821
16.10.3	Application : essai de nappe dans la plaine alluviale de la Seine (méthode de Jacob)	826
16.11	Mesure de la perméabilité à l'eau et à l'air en laboratoire	834
16.11.1	Perméabilité à l'eau des sols saturés	834
16.11.1.1	Perméamètre à charge constante	834
16.11.1.2	Perméamètre à charge variable	835
16.11.2	Perméabilité à l'eau et à l'air des sols non saturés	836
16.12	Mesure <i>in situ</i> de l'infiltration	839
16.12.1	Méthodes de mesure de l'infiltration	840
16.12.2	La méthode de Porchet	842
16.12.2.1	Appareillage – Méthode à niveau constant	842
16.12.2.2	Application : test de faisabilité d'un dispositif d'assainissement non collectif	844
16.12.3	Le perméamètre de Guelph	844
16.13	Conclusions	850
16.14	Références	850

Chapitre 17	Actions du sol sur un écran	855
17.1	Équilibres limites de poussée et butée	856
17.1.1	État initial	856
17.1.2	Mobilisations des équilibres de poussée et de butée	857
17.1.2.1	Équilibre de poussée	857
17.1.2.2	Équilibre de butée	859
17.2	Calculs des coefficients de poussée et de butée d'un sol pesant	859
17.2.1	Théorie de Coulomb	860
17.2.2	Méthode de Rankine	862
17.2.2.1	Cas général	863
17.2.2.2	Cas particulier	865
17.2.3	Méthode de Boussinesq	869
17.3	Calculs des coefficients de poussée et butée d'un sol non pesant	871
17.3.1	Méthode de Rankine	871
17.3.2	Équilibre généralisé de Prandtl	872
17.4	Calculs des coefficients de poussée et de butée	874
17.5	Calculs de la poussée et de la butée pour un sol frottant et cohérent	878
17.6	Choix de l'angle de frottement sol-écran	879
17.7	Application au calcul de la poussée d'un terrain surmonté d'un talus semi-infini sur un écran vertical	880
17.7.1	Méthode de Coulomb	881
17.7.2	Méthode de Rankine	883
17.7.3	Méthode de Boussinesq – tables de Caquot, Kérisel, Absi	884
17.8	Calculs de la poussée et de la butée pour un talus de géométrie quelconque	885
17.8.1	Cas simples	885

17.8.2	Cas complexes	886
17.8.3	Application	887
17.9	Dispositions particulières de surcharges	889
17.9.1	Solution en élasticité linéaire	889
17.9.2	Solution en plasticité	892
17.9.2.1	Surcharge semi-infinie limitée sur un plan horizontal	892
17.9.2.2	Surcharge linéaire	892
17.9.2.3	Surcharges locales	893
17.10	Cas d'un multicouche	895
17.11	Applications de la poussée sur un mur de soutènement	895
17.11.1	Remblai monocouche non cohérent	896
17.11.1.1	Poussée due au remblai	896
17.11.1.2	Poussée due à la surcharge	897
17.11.2	Remblai monocouche frottant et cohérent	897
17.11.3	Remblai bicouche frottant et cohérent	898
17.12	Influence de la pression interstitielle u	900
17.12.1	Application au mur de soutènement, nappe statique	900
17.12.1.1	Poussée due aux grains	901
17.12.1.2	Poussée due à l'eau	902
17.12.1.3	Poussée due à la surcharge	902
17.12.1.4	Bilan de la poussée du remblai sans et avec nappe	902
17.12.2	Application de calculs de poussée et butée d'un massif de sol soumis à un écoulement sur un écran	903
17.13	Références	908

Chapitre 18 Mouvements de terrain et stabilité des pentes	911
18.1 Description des mouvements de terrain	911
18.1.1 Facteurs d'instabilité	912
18.1.2 Classements des mouvements de terrain	912
18.1.3 Affaissements et effondrements	912
18.1.3.1 Anciennes carrières de la région parisienne	914
18.1.3.2 Recherche et localisation des marnières en Haute-Normandie	914
18.1.4 Les écroulements rocheux	917
18.1.5 Le fluage des terrains	919
18.1.6 Les coulées boueuses et les laves torrentielles	919
18.1.7 Les glissements	920
18.2 Méthodes de calcul de stabilité des massifs de sol	922
18.2.1 Différentes méthodes	922
18.2.2 Définition du critère de rupture	923
18.2.3 Définition du coefficient de sécurité	923
18.2.3.1 Coefficient de sécurité global	923
18.2.3.2 Coefficients de sécurité partiels	924
18.2.4 Détermination de la géométrie de la rupture	925
18.3 Calculs à l'équilibre limite	926
18.3.1 Glissements plans avec ou sans écoulement	926
18.3.1.1 Sol frottant, non cohérent, sans nappe	930
18.3.1.2 Sol frottant et cohérent, sans nappe	930
18.3.1.3 Sol frottant, non cohérent, nappe affleurante en écoulement	931
18.3.1.4 Applications	931
18.3.2 Calculs des glissements de surfaces quelconques	932
18.3.2.1 Équation générale du problème de stabilité au glissement (méthode des tranches)	932
18.3.2.2 Méthode de Fellenius (1927)	934

18.3.2.3	Méthode de Bishop simplifiée (1954)	935
18.3.2.4	Méthode des perturbations (1974)	937
18.3.2.5	Choix des valeurs de σ_0 et v	938
18.3.2.6	Conclusions	938
18.4	Calcul à la rupture	939
18.4.1	Présentation du calcul à la rupture	939
18.4.1.1	Comportement élastique linéaire, parfaitement plastique	940
18.4.1.2	Comportement élastique linéaire, fragile	941
18.4.2	Approche du calcul à la rupture	942
18.4.2.1	Approche statique par l'intérieur	942
18.4.2.2	Approche cinématique par l'extérieur	943
18.4.2.3	Application de calculs sur ordinateur	945
18.5	Méthode de calcul aux éléments finis	947
18.6	Résolution de cas simples par abaques	948
18.6.1	Abaque de Biarez	948
18.6.2	Abaques de Chen	950
18.7	Remblais sur sols compressibles	954
18.7.1	Types de rupture	954
18.7.1.1	Rupture par poinçonnement	955
18.7.1.2	Rupture rotationnelle	955
18.7.2	Caractéristiques nécessaires aux calculs de stabilité	956
18.7.3	Vérifications vis-à-vis du poinçonnement	958
18.7.4	Vérifications vis-à-vis de la rupture rotationnelle	960
18.7.4.1	Vérification par abaques dans les cas simples	960
18.7.4.2	Vérifications par logiciels dans les cas courants et complexes	963
18.8	Analyse de la stabilité des pentes des sols non saturés	968
18.8.1	Critère avec prise en compte de l'effet de la succion dans la cohésion	968
18.8.2	Critère avec prise en compte de l'effet de la succion dans la contrainte normale	969

18.8.3	Analyse en régime permanent	969
18.8.4	Analyse en régime transitoire	970
18.8.4.1	Méthode couplée	970
18.8.4.2	Méthode non couplée	970
18.9	Références	972
Index		975
Table des matières		983

Achevé d'imprimer sur les presses de Jouve à Mayenne
N° d'imprimeur : 2620625H
Dépôt légal : septembre 2017

Imprimé en France

Théorie et pratique de la géotechnique

Tome 1

Avant de concevoir et dimensionner les ouvrages liés au sol ou souterrains, un ensemble de connaissances en géosciences est indispensable pour établir un modèle géotechnique.

L'objectif de ce livre est de fournir les outils pour élaborer ce modèle. Avec celui-ci, les professionnels peuvent ensuite aborder la conception, le dimensionnement et le calcul des ouvrages.

L'analyse débute par les études géologiques et hydrogéologiques nécessaires à la description et à la compréhension d'un site naturel sur lequel insérer un ouvrage. Ensuite, les reconnaissances géophysiques et géologiques permettent d'identifier les sols, de les classer et d'aboutir à l'élaboration d'un modèle géologique et hydrogéologique. Puis la mécanique des sols traite des sols saturés mais également des sols non saturés et analyse les principales lois de comportement utilisées par les professionnels. Les essais en laboratoire et *in situ*, décrits dans l'ouvrage, déterminent les paramètres de ces lois.

Les bases complètes pour dimensionner tout type de soutènement sont exposées, puis sont fournis les outils nécessaires pour vérifier la stabilité générale de tous les ouvrages et les éléments permettant le dimensionnement de la stabilité des sols renforcés. De nombreuses applications, souvent complétées par des calculs utilisant la méthode aux éléments finis, sont proposées pour mettre en pratique les théories qui sont développées.

Cette nouvelle édition prend en compte l'évolution de la pratique géotechnique, des normes, en particulier de la norme NF P 94-500 sur les missions d'ingénierie géotechnique.

Ce traité s'adresse aussi bien aux géotechniciens des bureaux d'études et des entreprises souhaitant maîtriser et optimiser la géotechnique qu'aux étudiants et élèves-ingénieurs désirant s'initier à la théorie et à la pratique de la géotechnique.

Claude Plumelle a assuré la direction de l'ouvrage. Ont participé à la rédaction :

Yu Jun Cui, professeur à l'école des Ponts ParisTech (ENPC).

Denis Fabre, professeur à la chaire de géotechnique du Cnam.

Olivier Fouché, maître de conférences à la chaire de géotechnique du Cnam.

Alain Hirschauer, expert judiciaire.

Claude Plumelle, professeur honoraire du Cnam.

Alain Tabbagh, professeur émérite à l'université Sorbonne Université.

Sommaire

- ▶ Géologie des sols
- ▶ Hydrologie et niveaux d'eau dans le sol
- ▶ Reconnaissance géophysique
- ▶ Reconnaissance géologique
- ▶ Identification et classification des sols
- ▶ Déplacements et déformations des massifs de sol
- ▶ Contraintes dans les massifs de sols
- ▶ Consolidation et fluage des sols
- ▶ Généralités sur les lois de comportement des sols
- ▶ Lois de comportement élastique
 - parfaitement plastique et modèle hyperbolique
- ▶ Lois élastoplastiques avec écrouissage de Cam-Clay
- ▶ Comportement des sols non saturés
- ▶ Hydraulique des sols
- ▶ Essais de laboratoire
- ▶ Essais *in situ*
- ▶ Aquifères, nappes et essais d'eau
- ▶ Actions du sol sur un écran
- ▶ Mouvements de terrain et stabilité des pentes

EXPERTISE
TECHNIQUE

EDITIONS

LE MONITEUR

Photographie de couverture
© Stocksolutions – Fotolia.com

ISSN 2262-5089
ISBN 978-2-281-14026-2



9 782281 140262